



ESCOLA NAVAL

talant de biefaire



Jodmilson Amaral Bastos Rita

Controlo de Condição na Marinha de São Tomé e Príncipe

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na
especialidade de Engenharia Naval, Ramo de Mecânica



Alfeite

2021



ESCOLA NAVAL



talant de bi-faire



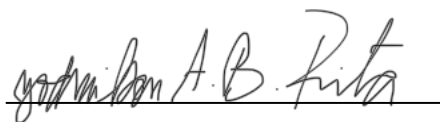
Jodmilson Amaral Bastos Rita

Controlo de Condição na Marinha de São Tomé e Príncipe

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na
especialidade de Engenharia Naval, Ramo de Mecânica

Orientação de:

O Aluno Mestrando



Jodmilson Amaral Bastos Rita

O Orientador



Hugo Filipe Diniz Policarpo

Alfrite

2021

Epígrafe

“A mente que se abre a uma nova ideia, jamais retornará ao seu tamanho inicial”, Albert Einstein, 1921.

Dedicatória

Dedico este trabalho a minha querida namorada, Jamilsa Gonçalves da Costa, por ter sido o meu suporte desde o início do ano letivo e consequentemente, deste trabalho. E ao meu filho Javier da Costa Bastos Rita.

Agradecimentos

Todos carecem da ajuda de outras pessoas para se desenvolver em diferentes áreas da vida. Este trabalho revelou-se trabalhoso em muitos aspetos, e foi preciso apoio direto e indireto de muitas pessoas para que se conseguisse concretizar a realização do mesmo, pelo que, gostaria de deixar os meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram para a realização do presente trabalho.

Agradeço em primeiro, a Deus todo-poderoso, pela sabedoria, saúde e persistência que me proporcionou ao longo do desenvolvimento deste trabalho;

Agradeço ao meu orientador, o Professor Hugo Filipe Dinis Policarpo pelo apoio prestado continuamente, desde o início deste trabalho até a data atual, mostrando-se sempre presente e disponível para partilhar diversos conhecimentos, assim como o apoio dado na estruturação do documento.

Agradeço ao Professor Doutor Rui Pedro Chedas Sampaio pelo conhecimento transmitido ao longo da minha carreira académica na Escola Naval, nas disciplinas de Vibrações Mecânicas, Gestão de Manutenção e Fiabilidade. Adicionalmente, pelas ideias partilhadas sobre o desenvolvimento do trabalho, em especial, pelos conhecimentos partilhados relativos ao Software *LabView*;

Agradeço aos Professores da Escola Naval, que ao longo dos anos contribuíram para o meu desenvolvimento, tanto fisicamente e academicamente, como em termos militares;

Agradeço em especial à minha namorada, Jamilsa Costa, que sempre acreditou no meu potencial e nunca se cansou de transmitir o apoio que da sua parte, me era prestado;

Agradeço ao meu pai Jerónimo de Sousa Bastos Rita e a minha mãe Izilda Quaresma dos Ramos Amaral, por serem os pilares da minha vida e o alicerce da minha carreira, graças à estas incríveis pessoas, hoje eu sou o que sou;

E de uma forma geral, gostaria de agradecer a toda a minha família, amigos e camaradas por estarem continuamente ao meu lado durante os cinco anos de formação.

Resumo

O controlo de condição é um processo que inerentemente se tem destacado em diversos setores industriais. A evolução do mundo tecnológico leva a que a procura de equipamentos da nova geração seja acrescida.

A maioria dos tipos de manutenção requerem grandes gastos, tanto financeiramente como em termos de material, como tal, torna-se necessário desenvolver métodos eficientes de monitorização dos mesmos equipamentos.

A Marinha de São Tomé e Príncipe encontra-se em meios de desenvolvimento pelo que é de grande utilidade, a implementação de manutenção assente no controlo de condição. Por forma a obter o melhor acompanhamento das máquinas, o que permite determinar/estimar a condição das mesmas, enquanto em funcionamento.

Na fase embrionária, fez-se a recolha de dados referentes as condições atuais da Marinha de São Tomé e Príncipe relativamente a manutenção. Deu-se uso aos conhecimentos relativos ao controlo e monitorização das condições das máquinas, por forma a estimar aplicabilidades satisfatórias deste método nesta Marinha.

Foi estimado o método a ser implementado nesta Marinha, na qual foi tido em conta alguns fatores, nomeadamente, financeiros e organizacionais. Criou-se um aplicativo no software *LabView*, com o objetivo de realizar a monitorização assente na análise de vibrações. As monitorizações são realizadas apenas em máquinas (*Condition Monitoring*).

Na fase experimental a validação dependeu de vários fatores, nomeadamente a aplicabilidade e o orçamento. Por estas razões, criou-se diferentes condições para garantir a implementação deste programa de manutenção na Marinha de São Tomé e Príncipe. Por ser aplicável, analisou-se experimentalmente a precisão do método. Posto isso, será proposto uma possível aplicação desta tese a Marinha de São Tomé e Príncipe, pois, esta dissertação visa contribuir de maneira acessível, para o desenvolvimento da mesma no âmbito de Controlo de Condição, por forma a condensar a problematização da sua situação financeira e operacional.

Palavras-chaves: Manutenção, Monitorização, Controlo de Condição, Vibração, Marinha de São Tomé e Príncipe.

Abstract

Condition Monitoring is a process that has inherently featured in various industrial sectors. The evolution of the technological world leads to an increased demand for new generation equipment.

Most types of maintenance require significant costs, financially and in terms of material, as such, it becomes necessary to develop efficient methods to monitor this equipment.

Sao Tome and Principe's Navy is in a developing stage, so it is very useful to implement a maintenance based on Condition Monitoring. To get the better monitoring of the machines, which allows determining/estimating their condition while in operation.

In the initial phase, data was collected regarding the current conditions of the Navy of São Tomé and Príncipe in relation to maintenance. The knowledge regarding the control and monitoring of the condition of the machines was used, to estimate the satisfactory applicability of this method in this Navy.

The method to be implemented in this Navy was estimated, considering some factors, namely, financial, and organizational. An application was created in LabView software, with the purpose of carrying out monitoring based on vibration analysis. The monitoring is carried out only on machines (Condition Monitoring).

In the experimental phase, validation depended on various factors, namely applicability and budget. For these reasons, different conditions were created to ensure the implementation of this maintenance program in São Tomé and Príncipe's Navy. For being applicable, the accuracy of the method was experimentally analyzed. Then, a possible application of this thesis to the Sao Tome and Principe Navy will be proposed, as this dissertation aims to contribute in an accessible manner, to the development of the same in the scope of Condition Monitoring, to condense the problematization of its financial and operational situation.

Keywords: Maintenance, Monitoring, Condition monitoring, Vibration, Navy of São Tomé and Príncipe.

Índice

Epígrafe	i
Dedicatória.....	iii
Agradecimentos.....	v
Resumo	vii
Abstract.....	ix
Índice	xi
Índice de Figuras	xv
Índice de Tabelas	xix
Índice de Fórmulas.....	xxi
Lista de abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	xxiii
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	3
1.2. Objetivos da Dissertação	3
1.3. Importância do tema	4
1.4. Metodologia/Estrutura da investigação	4
1.5. Estado da arte	5
2. Manutenção.....	9
2.1. Fundamentos de Manutenção.....	11
2.1.1. Classificação da Manutenção.....	11
2.1.2. Tipos de Manutenção	12
2.1.3. Gestão de Manutenção	16
2.2. Fiabilidade.....	22
3. Controlo de Condição	25
3.1. Conceito	27
3.2. Definição do Controlo de Condição	28
3.3. Objetivos principais	28

3.4.	Vantagens e Benefícios.....	28
3.5.	Tipos de Controlo de Condição.....	29
3.5.1.	<i>Structural Health Monitoring</i>	29
3.5.2.	<i>Condition Monitoring</i>	30
4.	Vibração.....	33
4.1.	Conceito.....	35
4.2.	Tipos de Vibração.....	35
4.3.	Análise de Vibrações.....	38
4.3.1.	Aquisição e Processamento de Sinal.....	40
4.3.2.	Metodologia de Implementação do Programa.....	48
4.4.	Limites de Vibrações.....	49
5.	Elaboração do Programa.....	53
5.1.	Metodologias.....	55
5.1.1.	Descrição da Ideia Inicial.....	55
5.1.2.	Objetivos Principais do Método.....	57
5.1.3.	Estrutura e Organização do Método.....	57
5.1.4.	Validação através de Funções Matemáticas.....	58
	Cálculo auxiliar da velocidade em RMS de funções contínuas e discretas.....	62
5.1.5.	Validação em Software de Simulações mecânicas.....	63
5.1.6.	Validação através de Medições em Motores Reais.....	68
5.1.7.	Criação do aplicativo VI no <i>LabView</i>	68
5.1.8.	Objetivo do aplicativo.....	69
5.1.9.	Metodologia de desenvolvimento do aplicativo.....	69
6.	Resultados.....	79
6.1.	Resultados validados experimentalmente por Funções Matemáticas.....	81
6.2.	Resultados validados experimentalmente por simulações Mecânicas no <i>WorkingModel</i>	83

6.3. Resultados validados experimentalmente pelo aplicativo criado em <i>LabView</i>	86
7. Conclusão.....	95
7.1. Conclusões Gerais	97
7.2. Lições aprendidas	98
7.3. Trabalhos Futuros	98
Referências Bibliográficas.....	101
Apêndice A – Tabela com valores limites da ABS	105
Apêndice B – Tabelas com valores limites da DNV GL.....	106
Apêndice E – Figuras com as codificações do programa em Labview	112
Apêndice F – Figuras com as imagens do painel frontal em <i>Labview</i>	113

Índice de Figuras

Figura 1 Evolução dos objetivos da manutenção. (Castro, 2013).....	11
Figura 2 Tipos de manutenção, Elaboração própria	16
Figura 3 Funções fundamentais de um Sistema de Gestão da Manutenção, Chedas Sampaio em 2011	17
Figura 4 Documentos do SMP, elaboração própria.	21
Figura 5 Structural Health Monitoring, (Google, s.d.).....	29
Figura 6 Condition Monitoring, (Google, 2018)	30
Figura 7 Vibração Periódica, elaboração própria. Elaboração própria.	35
Figura 8 Vibração Aleatória. Elaboração própria	36
Figura 9 Vibração livre, elaboração própria.....	36
Figura 10 Vibração Forçada, elaboração própria	37
Figura 11 Vibração amortecida.....	37
Figura 12 Vibração não amortecida, elaboração própria.....	38
Figura 13 Transdutor de vibração mecânica (htt).....	40
Figura 14 Condicionador de Sinal (htt1).....	40
Figura 15 Placa de aquisição de dados, (National instruments, 2021)	41
Figura 16 Computador. (Sampaio, 2021)	41
Figura 17 Resposta em posição no domínio do tempo. Elaboração própria.....	43
Figura 18 Soma de harmónicas. elaboração própria.	43
Figura 19, Soma de harmónicas, Elaboração própria	44
Figura 20, Domínio do tempo para o domínio da frequência. Elaboração própria.....	44
Figura 21 Janela Retangular, Chedas Sampaio	45
Figura 22 Janela de Hanning, (Sampaio, 2021)	46
Figura 23 Princípio de Leakage e aplicação de Janelas. (Fernandes, 2019).....	46
Figura 24 Aliasing provocado por uma taxa de amostragem relativamente baixa, (Wikipédia, s.d.).....	47
Figura 25 Princípio de Aliasing, (F. Duan, "Diagnostics of Rotor and Stator Problems in Industrial Induction Motors, s.d.)	47
Figura 26 Filtro Anti-aliasing com efeito Roll-Off, (htt2).....	48
Figura 27 Tabela com o protocolo de medição de vibração para navios. DNV GL.....	52
Figura 28 Baía de Ana Chaves, São Tomé. (htt3).....	55
Figura 29, Navio Príncipe da Marinha de STP, (htt4)	56

Figura 30, possíveis equipamentos a serem considerados. (htt5).....	56
Figura 31 Resposta no tempo em posição, elaboração própria.....	59
Figura 32 Resposta no tempo em velocidade, elaboração própria.....	60
Figura 33 Comparação, resposta no tempo em posição. Elaboração própria.....	61
Figura 34, Comprovação da fórmula do RMS utilizando a função seno, elaboração própria.	62
Figura 35 Rotor homogêneo em rotação. Elaboração própria.....	63
Figura 36 Rotor não homogêneo em rotação. Elaboração própria.....	63
Figura 37 Sistema de massa e mola com rotor homogêneo criado no Working Model. Elaboração própria.....	64
Figura 38 Velocidade do rotor(m/s). Elaboração própria.....	64
Figura 39 Medição de Velocidade no eixo y. Elaboração própria.....	66
Figura 40 Sistema de massa e mola com rotor não homogêneo criado no Working Model. Elaboração própria.....	66
Figura 41 Simulador de um sistema massa mola, com motor assentado na placa superior. Elaboração própria.....	67
Figura 42 Medição de velocidade de um sistema de massa e mola com rotor não homogêneo criado no Working Model. Elaboração própria.....	67
Figura 43 Análise dos dados recolhidos no WorkingModel, sistema homogêneo. Elaboração própria.....	67
Figura 44 Análise dos dados recolhidos no WorkingModel, sistema não homogêneo. Elaboração própria.....	68
Figura 45 Painel Frontal, Credenciais de acesso. Elaboração própria.....	70
Figura 46 Painel frontal principal. Elaboração própria.....	70
Figura 47 Painel frontal Principal, modelo final. Elaboração própria.....	71
Figura 48 Resposta no domínio do tempo. Elaboração própria.....	72
Figura 49 Resposta no domínio da frequência. Elaboração própria.....	73
Figura 50 Bloco de diagrama. Elaboração Própria.....	73
Figura 51 Codificação das credenciais. Elaboração própria.....	74
Figura 52 Aquisição e Leitura dos dados do Acelerómetro. Elaboração própria.....	75
Figura 53 Simulador de sinal. Elaboração própria.....	76
Figura 54 Simulador de Sinal. Elaboração própria.....	76
Figura 55 Criação da Combo Box com as máquinas e os limites de velocidade das Normas. Elaboração própria.....	77
Figura 56 Gravar valores. Elaboração própria.....	78
Figura 57 Estimativa das constantes associadas a resposta no tempo em posição de	

vibração forçada. Elaboração própria.....	81
Figura 58 Valor do RMS através da função da resposta no tempo em velocidade. Elaboração própria.....	82
Figura 59 Valor do RMS através da função da resposta no tempo em velocidade com valores alterados. Elaboração própria.....	82
Figura 60 Sistema de massa e mola com rotor homogéneo criado no Working Model. Elaboração própria.....	83
Figura 61 Análise dos dados recolhidos no WorkingModel, sistema homogéneo. Elaboração própria.....	84
Figura 62 Resultado do RMS, Elaboração Própria.	84
Figura 63 Simulador de um sistema massa mola, com motor assentado na placa superior. Elaboração própria	84
Figura 64 Análise dos dados recolhidos no WorkingModel, sistema não homogéneo. Elaboração própria.....	85
Figura 65 Simulador de um sistema massa mola, com motor assentado na placa superior. Dados mais aproximados. Elaboração própria.....	85
Figura 66 Valor da velocidade em RMS. Elaboração própria.	86
Figura 67 Análise dos dados recolhidos no WorkingModel, sistema não homogéneo. Versão atualizada. Elaboração própria.....	86
Figura 68 Motor elétrico da sala 23. Elaboração própria.....	87
Figura 69 Resposta no domínio da frequência. Medição real no motor elétrico da sala 23. Elaboração própria.....	87
Figura 70 Resposta no domínio da frequência Elaboração própria.	88
Figura 71 Valores do RMS. Elaboração própria.	88
Figura 72 Resposta no domínio da frequência. Elaboração própria.	89
Figura 73 Resposta no domínio do tempo. Elaboração própria.....	89
Figura 74 Resultados dos RMS.....	90
Figura 75 Resposta no domínio da frequência. Elaboração própria.	90
Figura 76 Resposta no domínio do tempo. Elaboração própria.....	90
Figura 77 Resposta no domínio da frequência em decibéis. Elaboração própria.....	91
Figura 78 Resposta no domínio do tempo. Elaboração própria.....	91
Figura 79 Resposta no domínio da frequência. Elaboração própria.	91
Figura 80 Resultados do RMS. Sistema com anomalia. Elaboração própria.	92
Figura 81 Valores limites estipulados pela Norma DNV	106
Figura 82 Valores limites estipulados pela Norma DNV	107
Figura 83 Valores limites estipulados pela Norma DNV	108

Figura 84 Valores limites estipulados pela Norma DNV	109
Figura 85 Valores limites estipulados pela Norma ISO 10816	110
Figura 86 Valores limites estipulados pela	110
Figura 87 Valores limites estipulados pela	110
Figura 88 Motor da sala 23, usado para experimentações.....	111
Figura 89 Motor da sala 23, usado para experimentações.....	111
Figura 90 Codificação do Programa	112
Figura 91 Painel frontal principal.....	113

Índice de Tabelas

Tabela 1 Dados do Motor. Elaboração própria.....	65
Tabela 2 Variáveis de entrada e de saída, LabView. Elaboração própria.....	71
Tabela 3 Resultados das Funções Matemáticas. Elaboração própria.....	83
Tabela 4 Resultados das simulações Mecânicas. Elaboração Própria.	86
Tabela 5 Tabela compilada com os resultados do Labview	92

Índice de Fórmulas

Fórmula 1 Frequência de amostragem.....	42
Fórmula 2, Resolução no tempo	42
Fórmula 3, Resolução no tempo	42
Fórmula 4, Frequência máxima.	42
Fórmula 5, Frequência máxima	42
Fórmula 6 Resposta em deslocamento no domínio do tempo.....	59
Fórmula 7 Resposta em deslocamento no domínio do tempo.....	59
Fórmula 8 Resposta em velocidade no domínio do tempo	60
Fórmula 9 Resposta em velocidade no domínio do tempo	60
Fórmula 10 Resposta em deslocamento no domínio do tempo	61
Fórmula 11 Resposta em velocidade no domínio do tempo.....	61
Fórmula 12 Resposta em velocidade no domínio do tempo.....	61
Fórmula 13 Root Mean Square.....	62
Fórmula 14 Root Mean Square.....	62
Fórmula 15 Average	62
Fórmula 16 Average	62
Fórmula 17 Root Mean Square.....	62
Fórmula 18 Percentagem da variação entre os RMS	62
Fórmula 19 Resposta no tempo em posição.....	81
Fórmula 20	81

Lista de abreviaturas, Siglas e Acrónimos

ABS (*American Bureau of Shipping*)

CARM (Carta de manutenção)

CM (*Condition Monitoring*)

DNV (Det Norske Veritas)

df (Resolução em frequência)

dt (Resolução no tempo)

DFT (*Discret Fourier Transform*)

EN (Escola Naval)

fa (Frequência de amostragem)

FFT (*Fast Fourier Transform*)

FIT (Ficha de trabalho)

fmax (Frequência máxima)

fn (Frequência natural)

FREM (Ficha de relato de manutenção)

GL (*Germanischer Lloyd's*)

Hz (*Hertz*)

ISO (*International Organization for Standardization*)

LEMS (Lista de equipamentos com manutenção semelhante)

LIMS (Lista de material de substituição)

MTBF (*Mean Time Between Failures*)

MTTF (*Mean Time to Failures*)

NA (Número de Avarias)

NB (Número de Bens observados)

PROGMAN (Programa de manutenção)

RMS (*Root Mean Square*)

RPM (Rotações por minuto)

SMP (Sistema de Manutenção Planeada)

SGM (Sistema de Gestão e Manutenção)

SHM (*Structural Health Monitoring*)

STRD (Sistema de tratamento e Recolha de Dados)

TO (Tempo em Operação)

TS (Tempo em Standby (pronto a operar))

TC (Tempo em Manutenção Corretiva)

TP (Tempo em Manutenção Preventiva)

VI (*Virtual Instrument*)

ZEE (Zona Económica Exclusiva)

Capítulo I

Introdução

Neste primeiro capítulo introduz-se o tema em estudo, começando com um breve enquadramento, após o qual se apresentam os objetivos a alcançar com a realização desta dissertação, seguindo-se a justificação da importância e relevância do tema. Este capítulo termina com uma breve descrição da sua estrutura e dos capítulos que o compõem.

1.1. Enquadramento

São Tomé e Príncipe é um pequeno país africano, formado por duas ilhas e localizado no golfo da Guiné. Possui aproximadamente 1001 km^2 de área terrestre e 160 milhas de área marítima.

Desde o fim da era colonial, as forças armadas subdividiram-se em quatro grandes ramos, nomeadamente, o Exército, a Guarda Costeira também denominada de Marinha, a Guarda Nacional e a Guarda Presidencial.

Como grande parte dos países africanos, São Tomé e Príncipe ainda se encontra em meio de desenvolvimento e uma das necessidades do país, consiste no desenvolvimento da sua Guarda Costeira, que, apesar de rica ainda carece de desenvolvimento.

O país possui uma pequena zona económica exclusiva (ZEE) e o grande objetivo da Guarda Costeira é a proteção dessa ZEE, e das áreas onde a exploração de petróleo e gás está sendo considerada. Os navios do país são, maioritariamente, pequenos e servem não só, para o transporte de pessoas e cargas entre as ilhas, como também, para garantir a fiscalização na área que possui um elevado índice de pirataria.

Relativamente a manutenção, não existe uma publicação ou norma que indique propriamente o sistema de manutenção do país, porém, são realizadas manutenções de periodicidade anual aos motores das embarcações. Também são realizadas manutenções para a largada, por forma a verificar a operacionalidade do navio para navegar, no entanto, pelo fato dos navios possuírem motores fora de bordo, o estudo neste âmbito ainda carece de muita atenção. Pelo que uma das vantagens da implementação do controlo de condição na Marinha de São Tomé e Príncipe seria a possibilidade de obter uma maior vida útil das máquinas ou até mesmo de estruturas desta Marinha.

1.2. Objetivos da Dissertação

Este trabalho tem como objetivos:

- Contribuir para o desenvolvimento da Marinha de São Tomé e Príncipe, no âmbito da manutenção.

- Selecionar, de acordo com as condições financeiras, o método adequado de controlo de condição para a Marinha de São Tomé e Príncipe.
- Validar experimentalmente os métodos seletados.
- Propor a aplicabilidade deste método na Marinha de São Tomé e Príncipe.

1.3. Importância do tema

Todas as máquinas estão sujeitas a avarias e anomalias, isso porque não existe nenhum tipo de máquina na qual a massa dos seus componentes está distribuída homogeneamente. A não homogeneidade faz com que os componentes da máquina exerçam numerosas forças com sentidos e direções enigmáticas sobre outros componentes. Com o tempo, estas forças causam danos e avarias.

Atualmente, é possível atrasar com grande eficácia, estas inevitáveis avarias. Se se souber exatamente a causa da falha, através da verificação pontual do funcionamento dos equipamentos, é possível impedir temporariamente uma avaria. Neste sentido, o controlo de condição permite aumentar a vida útil dos equipamentos e consequentemente da máquina.

Apesar de São Tomé e Príncipe ser um país pequeno, é difícil refutar as necessidades organizacionais do mesmo. E isso abrange a sua pequena Guarda Costeira, que na realidade tem muito a oferecer.

A posição geográfica do país, possibilita atuar dinamicamente em quaisquer operações no Golfo da Guiné, quer seja em caso de transporte de cargas ou até mesmo no âmbito da fiscalização marítima. Essa vertente requiere a operacionalidade dos navios associados, portanto, a motivação para este trabalho está relacionada à necessidade de elaborar de forma sintetizada, um plano de controlo de condição para os navios desta Marinha.

1.4. Metodologia/Estrutura da investigação

A tese é composta por sete capítulos, sendo que cada um desenvolve respetivamente:

Capítulo I: Introdução; Enquadramento teórico, Objetivos da dissertação, Importância do tema, Metodologia/estrutura da investigação e o Estado da arte;

Capítulo II: Manutenção, Manutenção Preventiva, Manutenção Corretiva, Manutenção Preditiva;

Capítulo III: Controlo de Condição, Aquisição e Processamento de sinal, Normas, Métodos de controlo de condição;

Capítulo IV: Vibrações, Tipos de Vibrações, Análise de Vibrações, Limites de Vibrações;

Capítulo V: Desenvolvimento do programa de Controlo de Condição a ser implementado na Marinha de São Tomé e Príncipe, fase experimental do desenvolvimento do programa;

Capítulo VI: Obtenção dos resultados, Discussão dos resultados obtidos

Capítulo VII: Conclusão, Lições Aprendidas, Sugestões para Trabalhos Futuros.

1.5. Estado da arte

O desenvolvimento do mundo tecnológico permitiu que, se alinhasse a evolução das aplicações informáticas à manutenção e se desenvolvessem várias técnicas e métodos na área do controlo de condição, o que conduziu à implementação de sistemas integrados de manutenção, e consequentemente os sistemas de aquisição e processamento de sinal. Atualmente, estas técnicas são aproveitadas por muitas indústrias, por forma a possuírem uma monitorização mais sofisticada dos seus bens.

Os investigadores, tem trabalhado neste sentido, por forma a estudar as assinaturas provocadas pelas anomalias em máquinas e utilizarem as técnicas de controlo de condição com possível implementação, advindo daqui trabalhos científicos de referência, dos quais alguns serão seguidamente referidos.

Thorsen e Dalva em 1998, apresentam uma sinopse sobre os métodos de controlo de condição, tanto como ferramenta de deteção, como de diagnóstico de dano. Os autores indicam como diferentes tipos de danos geram diferentes componentes de frequência, tendo-se aplicado a análise de corrente para

demonstrar a detecção de anomalias em rolamentos. É referido ainda, a aplicação de métodos estatísticos de processamento de sinal à análise de vibrações em rolamentos. Isto é, sabendo-se que um rolamento em boas condições possui uma distribuição Gaussiana dos seus valores de frequência, basta que os dados provenientes do acelerómetro disturbem essa distribuição para geralmente se poder concluir a existência de alguma anomalia. (Dalva, Setembro 1998)

Nandi e Al em 2005, publicam uma revisão bibliográfica onde descrevem diferentes tipos de danos em motores, principais métodos e técnicas para o seu diagnóstico e o que é gerado pelas suas assinaturas de vibração, bem como é discutida a automatização dos sistemas de detecção e de diagnóstico através da aplicação de algoritmos baseados em inteligência artificial. (S. Nandi, Dezembro de 2005)

Basak e Al em 2006, apresentam uma análise estatística alusiva ao aumento da fiabilidade dos sistemas quando estes adotam uma filosofia de controlo de condição, mostrando que a aplicação de um sistema de controlo de condição 80% eficiente, consegue aumentar substancialmente a fiabilidade do sistema. Apresentam também uma breve revisão bibliográfica relativa às assinaturas de diversos danos através de vários métodos, como a análise de corrente, análise de vibrações, análise termográfica, análise de potência e análise de torque. (D. Basak, 2006)

No mesmo ano, Liu e Ganeriwala, estudam o diagnóstico de barras com dano através da análise de corrente, recorrendo a utilização de um simulador de anomalias em motores elétricos produzidos pela SpectraQuest. Utilizaram 3 motores de indução com rotor em gaiola de esquilo, um saudável e outros dois, respetivamente, com 3 e 6 barras com dano. Fixaram a alimentação do motor em 35 Hz e ao longo das experiências foram variando a carga do motor para perceber qual a influência desta na assinatura de corrente do mesmo. Os dados obtidos foram analisados através do VibraQuest, software também desenvolvido pela SpectraQuest. Concluindo-se que os motores com barras com dano, comparativamente ao motor saudável, apresentam no espectro de corrente alterações significativas de amplitude nas frequências de banda lateral em torno da frequência de alimentação, tendo-se verificado que o efeito da carga na amplitude

destas frequências não varia de forma muito clara, sendo relativamente difícil reconhecer uma tendência. (Ganeriwala, Janeiro 2006)

Já em 2008, Blodt et al., investigam a detecção de danos em rolamentos através da análise de corrente do estator e propõe um novo modelo de anomalias relacionadas com a variação do espaço no entreferro e no torque da carga. Fizeram um estudo experimental com alguns rolamentos defeituosos, medindo a vibração, o torque do motor e a corrente do estator, revelando a análise espectral alterações no espectro de corrente de acordo com os valores de frequência apresentados teoricamente. (M. Blodt, 7 April 2008)

No ano de 2009, Mertens Jr. e Ribeiro, utilizam a análise de vibração e de corrente em simultâneo para a detecção de barras com dano em motores elétricos de indução presentes em compressores herméticos. Utilizou-se a análise de corrente devido à sua sensibilidade e a análise de vibração de modo a obter indiretamente o valor de rotação do rotor. O objetivo foi utilizar a análise de vibração para, de forma não intrusiva, mostrar o valor de rotação do rotor e utilizar este valor no cálculo correto do escorregamento do motor e, conseqüentemente, das frequências anormais geradas pelo dano. A atividade experimental foi realizada pela utilização de alguns motores com diferente número de barras com dano e diferentes ângulos entre estas. No final, comprovou-se que o método em questão é eficaz na maioria dos casos, bem como, que a posição das barras danificadas influencia na sua detecção. (Ribeiro, 2009)

Esta temática apresenta grande relevância não só no âmbito militar como também marítimo, porém apesar deste assunto já ter sido abordado por diversos autores, infelizmente, ainda não foi encontrado nenhum trabalho onde se estudasse a possibilidade de implementá-lo na Marinha de São Tomé e Príncipe.

Capítulo II

Manutenção

Neste segundo capítulo serão apresentados os fundamentos de Manutenção, onde serão abordados a sua definição, composição e a respetiva estruturação na Marinha Portuguesa. E por fim será abordado a Fiabilidade.

2.1. Fundamentos de Manutenção

O grande avanço tecnológico nas indústrias viabilizou de certa forma, a forte competição que atualmente existe entre as mesmas. Fez com que houvesse um maior interesse em adquirir as informações mais atualizadas. Atualmente, as empresas procuram atingir a maior eficiência em todos os seus domínios. E é assim que o sistema de manutenção tem assumido grande importância no âmbito produtivo das indústrias.

Como tudo, no mundo tecnológico, o sistema de manutenção também esteve sujeito a evoluções; ver figura 1.

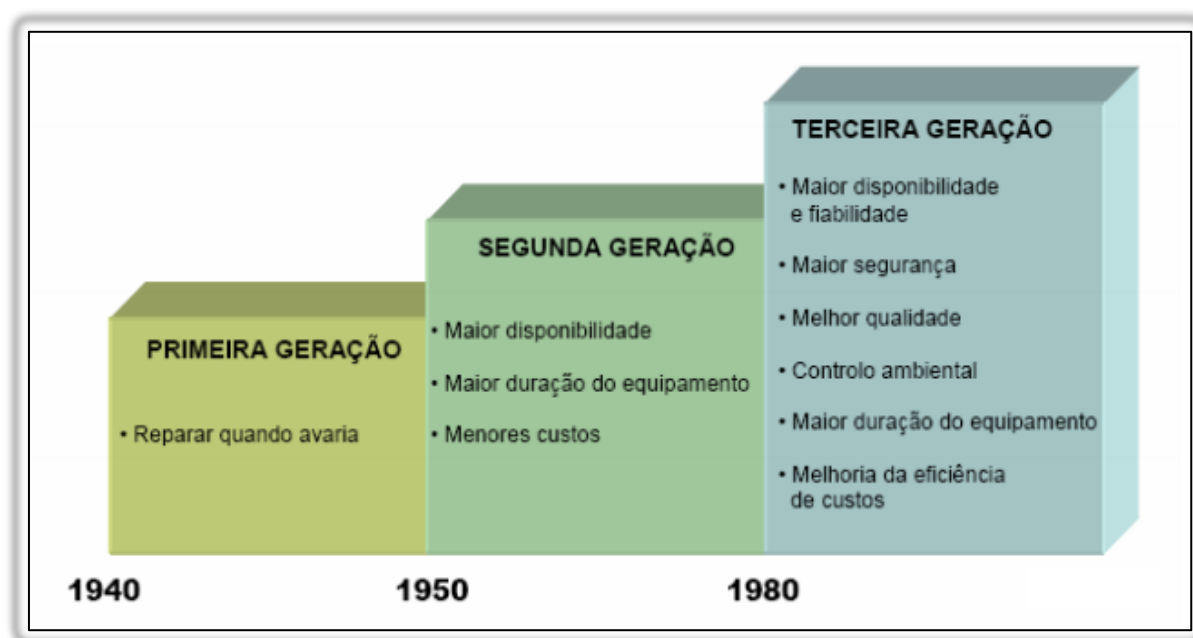


Figura 1 Evolução dos objetivos da manutenção. (Castro, 2013)

2.1.1. Classificação da Manutenção

Para cada tipo de necessidade de utilização do equipamento e/ ou dependendo do grau de importância do equipamento, existe uma entidade encarregue de tratar os dados para a realização da manutenção. Isto porque na Marinha Portuguesa a realização da manutenção está dividida em escalões, nomeadamente:

- Manutenção de 1º Escalão (Navio);
- Manutenção de 2º Escalão (Comando administrativo (CA));
- Manutenção de 3º Escalão (Direção dos navios (DN));

Manutenção de 1º Escalão

A manutenção do 1º escalão está encarregue ao navio e a supervisão é feita superiormente, ou seja, pelo CA e pela DN. Para o 1º escalão estão incluídos pequenos trabalhos de manutenção que implicam a substituição de artigos e a utilização de ferramentas ou aparelhagem de prova da dotação de bordo e/ ou de terra, incluindo ajustamentos, afinações e provas, cuja realização é possível no âmbito dos serviços dos meios navais. (Marinha Portuguesa, 1998)

Manutenção de 2º Escalão

A manutenção do 2º escalão está encarregue ao CA. Para este escalão estão incluídos trabalhos de manutenção que implicam a substituição de artigos e a utilização de ferramentas ou aparelhagem de prova da dotação de bordo e/ ou de terra, incluindo ajustamentos, afinações e provas, cuja realização não é possível no âmbito dos serviços dos meios navais, mas sim com o apoio da capacidade humana e oficial existente ou posta a disposição do CA, a que o meio naval se encontra atribuído. (Marinha Portuguesa, 1998)

Manutenção de 3º Escalão

A manutenção do 3º escalão é da responsabilidade da DN e pela sua complexidade e/ ou dimensão dos meios técnicos e oficiais a mobilizar, excedem a capacidade de intervenção dos órgãos inseridos na linha de comando a que o meio naval se encontra atribuído, e cuja especificidade requer a intervenção do organismo com funções de direção técnica. São realizados pelo Arsenal do Alfeite ou pelo fabricante do objeto, ou por entidades congéneres. (Marinha Portuguesa, 1998)

2.1.2. Tipos de Manutenção

Tem havido variações relativas à definição de manutenção, isto porque, inicialmente esse termo era usualmente usado no ramo da engenharia, porém a manutenção nada mais é do que um conjunto de ações que permitem assegurar o melhor funcionamento de um bem, aumentando assim a sua vida útil. (Sampaio, 2021)

A vida útil de um dado equipamento depende de três fases importantes, nomeadamente:

- Projeto;
- Operação;
- Manutenção.

A fase de projeto tem como objetivo reunir todas as ferramentas necessárias para a elaboração e construção do equipamento. Isto para garantir que o funcionamento do equipamento é vantajoso e rentável. (Sampaio, 2021) A fase de operação compreende justamente o período funcional e operacional do equipamento, sendo que a vida útil também depende da função do equipamento. O objetivo é de garantir que esta fase seja a mais longa possível. E é desta forma que a fase de manutenção ganha realce, pois, esta é responsável por garantir que o equipamento consiga cumprir a função requerida. (Sampaio, 2021)

Existem dois tipos de manutenção:

- Corretiva;
- Preventiva.

➤ **Manutenção Corretiva**

Manutenção corretiva é realizada com o objetivo de resolver um dano ou uma avaria e destina-se a repor o material num estado operacional especificado. Para resoluções definitivas denomina-se de Manutenção corretiva curativa e para resoluções temporárias, chama-se de Manutenção corretiva paliativa. Normalmente esta atividade técnica é executada após a ocorrência da avaria. (Marinha Portuguesa, 1998)

Relativamente a manutenção corretiva, esta divide-se em quatro tipos:

- Manutenção corrente ou normal;
- Manutenção eventual;
- Manutenção urgente;
- Manutenção muito urgente.

❖ **Manutenção Corrente ou Normal**

A manutenção corrente ou normal está relacionada com a reparação de

avarias que não comprometem a segurança nem a operacionalidade dos meios navais, ou dos seus sistemas ou equipamentos, e cuja natureza permite que sejam executadas nos períodos de imobilização estipulados nas ações de manutenção planeada. (Marinha Portuguesa, 1998)

❖ **Manutenção Eventual**

A manutenção eventual está relacionada a reparação de avarias que comprometem a segurança nem a operacionalidade dos meios navais, ou dos seus sistemas ou equipamentos, ou ainda o bem-estar do pessoal, e cuja natureza impede que sejam executadas sem intervenção nos seus planos de utilização, delimitando a sua passagem a uma situação de indisponibilidade e o seu restauro fora dos períodos de imobilização estipulados nas ações de manutenção planeada. (Marinha Portuguesa, 1998)

❖ **Manutenção Urgente**

A manutenção urgente são trabalhos de manutenção corretiva relacionados a avarias que comprometem a segurança ou a operacionalidade dos meios navais, ou dos seus sistemas ou equipamentos, ou ainda o bem-estar do pessoal, e cuja natureza permite que sejam executados em curto espaço de tempo não interferindo com os planos de utilização desses meios.

❖ **Manutenção Muito Urgente**

A manutenção urgente são pequenos trabalhos de manutenção corretiva relacionados a avarias que constituem perigo imediato para o material ou pessoal, e cuja natureza permite que sejam executados imediatamente, não interferindo com o plano de utilização dos meios navais. E a grande diferença está precisamente relacionada com a gravidade da falha. Como por exemplo, a danificação da vela do motor, que impossibilita ligar o motor e que, por conseguinte, a utilização do veículo. Por outro lado, existem algumas avarias como a danificação da pintura do veículo, que não afetam propriamente o funcionamento do veículo.

➤ **Manutenção Preventiva**

Relativamente à manutenção preventiva, esta destina-se a diminuir a probabilidade de avaria, através de especificações de fabricantes e/ou análises recorrentes do comportamento do material. Esta define-se pela necessidade de

intervenção ao longo do ciclo, com vista a garantir o melhor funcionamento dos equipamentos, evitando assim:

- Riscos pessoais;
- Riscos para a segurança;
- Riscos para a operacionalidade dos navios;
- Baixa vida útil do equipamento;
- Redução de custos.

Estas intervenções incluem funções desde verificações de funcionamento a desmontagem dos equipamentos para a revisão geral. Ou seja, não dependem propriamente da ocorrência da avaria, contrariamente, esta existe precisamente para impedir que ocorram as avarias. É um método importante de controlo de qualquer bem, contribuindo para o aumento da sua vida útil. O método preventivo não evita o método corretivo embora seja mais sofisticado, porém, apesar de todo o avanço, ainda não se conseguiu desconsiderar a grande utilidade do método corretivo, isto porque, os danos e as avarias são acontecimentos naturais e inevitáveis. (Marinha Portuguesa, 1998)

Ainda no âmbito da Manutenção Preventiva, existem dois modelos a considerar: Preventiva Sistemática e a Preventiva Condicionada, do qual, a Manutenção Preventiva Condicionada é a Manutenção preditiva, atualmente denominada de Controlo de Condição, o tema fundamental desta tese e que será desenvolvido no 4º Capítulo. A principal diferença entre a Manutenção Preventiva Sistemática e a Manutenção Preventiva Condicionada, é que, a primeira é um combinado de ações técnicas e administrativas a executar sobre o material, ao longo do seu ciclo de manutenção empregando meios de diagnósticos apropriados para o seu controlo, em função do tempo decorrido, com a finalidade de adaptar a execução das intervenções de manutenção ao estado do material, ou seja, esta é realizada em períodos predispostos, levando em conta o tempo de uso, como por exemplo, a inspeção anual dos veículos, são realizadas porque este é o período estipulado de revisões de avarias e não porque o veículo avariou. Enquanto, a segunda é um combinado de ações técnicas e administrativas a executar sobre o material, utilizando meios de diagnósticos adequados para o seu autodomínio e controlo, com

a finalidade de adequar a realização das intervenções de manutenção ao estado do material, ou seja, esta é realizada com base em parâmetros previamente estipulados, como se fosse uma monitorização das peças e acessórios das máquinas, através de sensores ou detetores de pequenas anomalias. Com a deteção das anomalias, significa que, certos componentes não funcionam dentro dos padrões normais, o que possibilita alterar estas pequenas anomalias e aumentar a durabilidade da máquina. (Marinha Portuguesa, 1998)

2.1.3. Gestão de Manutenção

Todos os equipamentos estão sujeitos a fenómenos naturais como, desgaste, sobrecarga, envelhecimento, contaminação, corrosão e mais. Com isso, torna-se necessário dar uso a ideia de manutenção, uma conceção que inevitavelmente se tem implementado em muitas empresas. Para a implementação de qualquer tipo de manutenção é necessário conhecer minimamente o conceito de gestão de manutenção; ver figura 2.

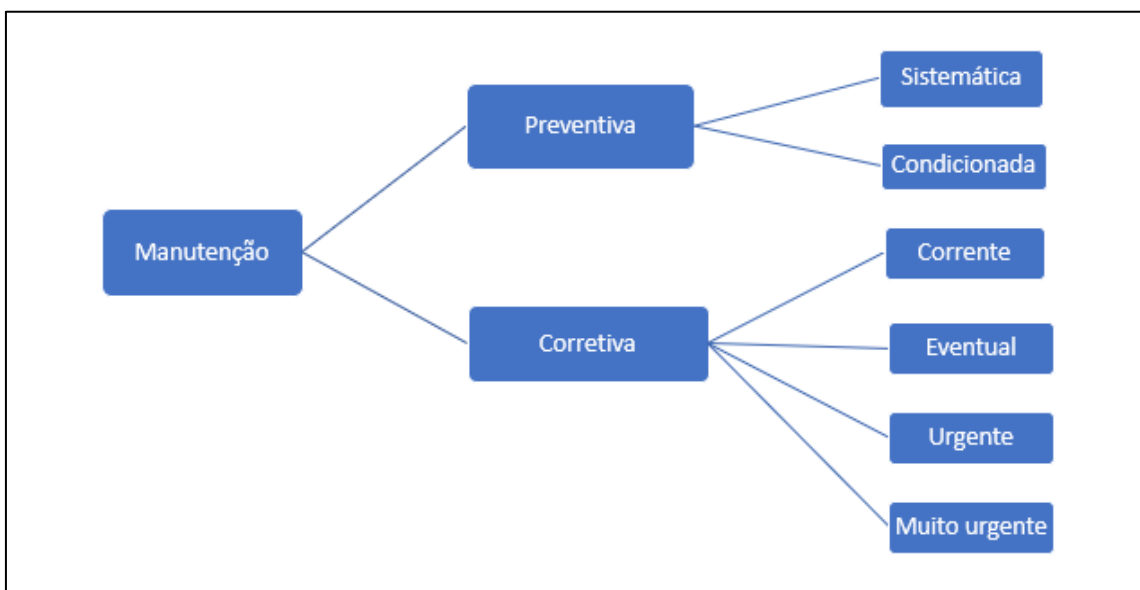


Figura 2 Tipos de manutenção, Elaboração própria

A Gestão de Manutenção são todas as atividades de gestão que viabilizam estrategicamente a uma boa manutenção, através de planeamentos, monitorizações e supervisões de manutenção. (Sampaio, 2021)

Sistema de Gestão da Manutenção

Na marinha portuguesa o SGM (sistema de gestão da manutenção) consiste em um conjunto de conceitos, ferramentas e procedimentos que viabilizam a

realização da manutenção de forma integrada com outras funções principais do sistema logístico, como por exemplo a construção, o abastecimento, o pessoal necessário, as infraestruturas e mais. (Sampaio, 2021)

O SGM, serve para prevenir as avarias de modo a garantir a disponibilidade operacional de certos navios, criando uma rentabilidade através do equilíbrio entre os custos e os benefícios, com apoio de sistemas de informação.

Este sistema tem como objetivo definir normas e procedimentos normalizados de manutenção, garantir a aplicação efetiva dos recursos e meios disponíveis, documentar e disponibilizar a informação relacionada com a manutenção, melhorar a manutenibilidade e a fiabilidade do material através de análise e exploração da informação disponível, identificar e minorar os custos de manutenção e muito mais.

As componentes principais deste sistema são:

- Planeamento;
- Execução;
- Informação;
- Controlo; ver figura 3.

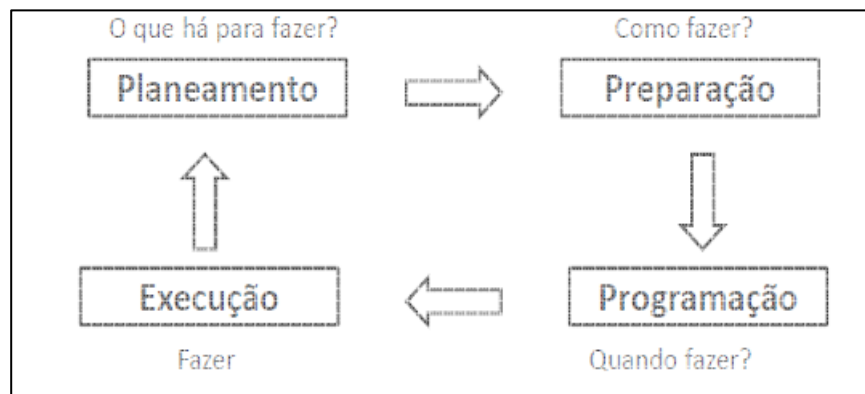


Figura 3 Funções fundamentais de um Sistema de Gestão da Manutenção, Chedas Sampaio em 2011

❖ Planeamento

Relativamente ao Planeamento, em termo de manutenção, este conceito visa especificar as necessidades e os procedimentos de manutenção e disponibilizar estes procedimentos ao longo do tempo, de acordo com critérios de custo/eficácia,

as cargas de trabalho decorrentes das necessidades de manutenção, tendo em conta as disponibilidades orçamentais, os recursos técnicos e oficiais/ abris existentes e as necessidades operacionais.

O planeamento da manutenção inclui:

- O Sistema de Manutenção Planeada (SMP);
- Os ciclos de manutenção dos meios navais;
- O Plano de Imobilização dos Meios Navais (PIMN), efetuado de acordo com um ciclo anual e um calendário do planeamento;
- Os programas de ações de manutenção inseridas no PIMN.

❖ **Execução**

A Execução visa a concretização do planeamento e inclui o controlo da execução, entendido como o conjunto das ações necessárias ao acompanhamento do processo de execução, permitindo a introdução de correções por forma a serem atingidos os objetivos previamente estabelecidos. Assim, o controlo de execução compreende a análise dos desvios relativamente ao programado (controlo dos prazos), o controlo de qualidade e o controlo de custos. (Sampaio, 2021)

A execução compreende:

- A determinação das necessidades de manutenção;
- A obtenção e a execução do esforço fabril ou oficial;
- O fornecimento de artigos necessários à execução dos trabalhos;
- A coordenação;
- O controlo de execução (englobando prazos, qualidade e custos).

❖ **Informação**

A Informação compreende a recolha, a análise, o tratamento e a difusão de dados de manutenção e constitui-se no Sistema de Recolha e Tratamentos de Dados (STRD).

❖ **Controlo**

O controlo do SGM consiste na avaliação do comportamento do sistema em vista o cumprimento dos objetivos, e inclui a escolha das medidas corretivas a tomar.

De forma resumida, o SGM está dividido em duas partes principais, o SMP e o SRTD. Sendo que o SMP compreende as manutenções preventivas, tanto sistemática como condicionada e o SRTD compreende o tratamento dos dados e das informações. (Sampaio, 2021)

Sistema de Manutenção Planeada

O Planeamento de Manutenção engloba no seu conceito geral, todas as análises e planeamentos associados ao estabelecimento dos requisitos necessários a sustentação operacional de um artigo. O Planeamento de Manutenção pode começar com a conceção e construção ou aquisição dos navios, sistemas ou equipamentos e visa um combinado de ações que viabilizam o seu apoio logístico integrado ao longo de todo o ciclo de vida.

Toda a informação é disponibilizada a partir da identificação da configuração, entendida como a exata identificação e documentação das características geométricas e funcionais de cada componente estrutural do sistema, até ao mais baixo nível de composição com relevância logística. Todo o componente com importância logística deverá possuir toda a informação necessária à sua manutenção, incluindo-se aqui a descrição sumária das tarefas de manutenção a realizar, periodicidades, tempo de realização, qualificação técnica do pessoal, sobressalentes e consumíveis associados a cada tarefa de manutenção, respetiva documentação técnica (manuais, desenhos, etc.), ferramentas especiais e equipamentos de teste. (Marinha Portuguesa, 1998)

Basicamente, o SMP é utilizado para garantir uma máxima fiabilidade dos materiais e dos equipamentos, por isso é composto por programas de manutenção, métodos normalizados de planeamento, métodos de controlo e mais. E para a realização do planeamento utiliza-se alguns documentos, nomeadamente:

- PROGMAN (Programa de manutenção)

- CARM (Carta de manutenção)
- FIT (Ficha de trabalho)
- FREM (Ficha de relato de manutenção)
- LIMS (Lista de material de substituição)
- LEMS (Lista de equipamentos com manutenção semelhante)

A carta de manutenção é o documento que relaciona toda a informação e todos os procedimentos de manutenção adequáveis e aplicáveis a um determinado bem. Normalmente são utilizados para o apoio na elaboração do planeamento. A FIT está contida na CARM, pois é onde se encontra a lista de manutenções aplicáveis a um determinado equipamento e não só, possui também todas as informações relativas ao equipamento.

Relativamente a periodicidade das FIT, estas são todas codificadas. Podendo ser de frequência simples ou composta dependendo do tipo de manutenção. A FIT por ser o documento que descreve detalhadamente o trabalho a fazer, é um dos mais importantes a ser entregue ao executante. Isto porque colmata informações importantes como, a forma de execução, a entidade executora, os acessórios necessários para a execução (LIMS), dados e ferramentas importantes para execução (FREMS), tempo necessário para cumprir com a execução, equipamentos com históricos semelhantes e que possam ajudar na execução (LEMS) e mais. (Marinha Portuguesa, 1998)

A FREM nada mais é do que um formulário com valores obtidos durante a execução do trabalho. Com o objetivo de viabilizar um melhor registo de controlo de qualidade, a FREM deverá apresentar os valores normais padrões de funcionamento adequado do equipamento, para que o executante tenha referência de valores que indicam um funcionamento anormal do equipamento; (Marinha Portuguesa, 1998) ver figura 4.

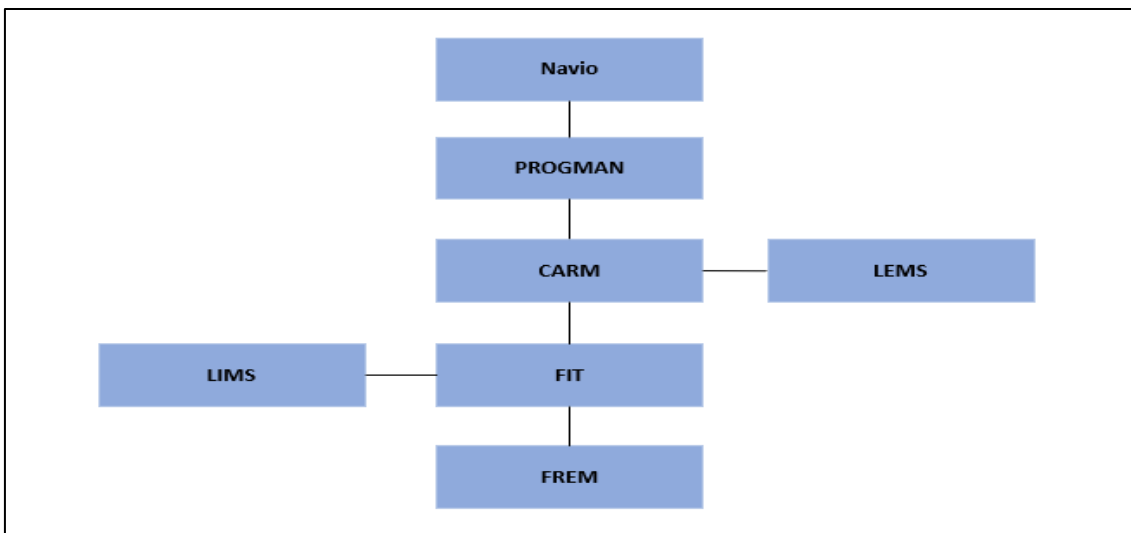


Figura 4 Documentos do SMP, elaboração própria.

Sistema de Recolha e Tratamentos de Dados

Como já mencionado anteriormente, manutenção é assim um dos serviços básicos do Sistema Logístico da Marinha, tanto pelas relações com a operacionalidade dos meios navais como pela quantidade importante dos recursos que consome. (Marinha Portuguesa, 1998)

A gestão da manutenção a nível da Marinha implica:

- Organização e planeamento geral
 - de ações de manutenção,
 - de recursos humanos e financeiros a utilizar,
 - dos extras necessários,
- direção
 - do pessoal,
 - dos serviços com vista ao resultado final, ou seja, a obtenção de uma taxa de operacionalidade ou de vantagem pré-estabelecida,
- Controlo,
 - da realização das ações projetadas,
 - da particularidade e da qualidade das intervenções,
 - da quantidade de recursos empregues,

- e do custo eficácia associados a este plano de manutenção e organização.

Estas funções dependem do correto funcionamento de um SISTEMA DE GESTÃO DE MANUTENÇÃO (S.G.M.). E a gestão envolve a existência de informação correta e permanente, por forma a servir de suporte à tomada de decisões. Por isso que o SGM necessita sempre de uma subfunção de informação, em que os dados e os procedimentos associados são desempenhados pelo Sistema de Recolha e Tratamento de Dados (S.R.T.D.). (Marinha Portuguesa, 1998)

Este sistema assenta-se no princípio da homogeneidade de objetivo. Isto significa que, pelo facto de haver diferenças nas tecnologias dos equipamentos e sistemas associados e, portanto, diferentes técnicas de manutenção, meios humanos e materiais utilizados na sua realização, reconhece-se que os princípios de gestão da manutenção (planeamento, direção, controlo e organização) são igualmente aplicados para qualquer que seja a área do material. Com efeito, resulta a possibilidade de padronizar e uniformizar os procedimentos de relato e processamento dos dados concebidos por todas as ações de manutenção a nível da Armada, disponibilizando esses dados ao serviço, não só da função manutenção, como também, ao serviço das outras funções logísticas. E isto viabiliza a melhores condições de apoio a utilização de métodos de tomada de decisão. (Marinha Portuguesa, 1998)

2.2. Fiabilidade

O Controlo de Condição tem como objetivo substituir os estudos da fiabilidade, contudo, existe uma certa possibilidade da implementação programa de manutenção não acontecer como planeado.

O controlo de Condição depende de ferramentas que armazenam dados, estes dados são verificados por amostras recolhidas anteriormente, daí a necessidade de se realizar estudos de fiabilidade. No entanto, é consideravelmente válido afirmar que o acontecimento de avarias é natural e inconstante, por isso, existe uma pequena

probabilidade de haver avaria, sem que se consiga verificar anomalia nos dados ou vice-versa.

O objetivo da manutenção consiste em reparar as avarias, entretanto, seria de grande utilidade, que as máquinas nem avariassem. Por isso, melhor do que reparar as avarias é precisamente evitá-las. Como visto anteriormente, ainda é impossível que um método garanta em percentagem total, o não acontecimento das avarias. No entanto tem-se conseguido grande avanço nesse sentido. (Sampaio, 2021)

Não se consegue, determinar em que momento exato irá ocorrer uma avaria. O que se pode fazer recorrendo à estatística, é estimar a probabilidade da ocorrência da avaria após um determinado intervalo de tempo decorrido. Estamos, assim, na presença de uma variável aleatória, o tempo entre avarias. Este raciocínio, torna possível estimar a probabilidade de um material não avariar a um determinado intervalo de tempo decorrido. (Sampaio, 2021) Este conceito pode ser definido como fiabilidade, ou seja, a probabilidade de um material desempenhar a função requerida durante um intervalo de tempo específico, sob condições definidas. A fiabilidade de um sistema ou conjunto depende da fiabilidade dos seus elementos ou acessórios, por isso, pode ser aplicada quer a produtos simples como um farol, quer a conjuntos complexos, como um navio. Pode também ser aplicada a sistemas de hardware ou de software, a sistemas táteis ou a sistemas abstratos, e sobretudo são determinadas na fase de conceção e produção do material. (Sampaio, 2021)

A fiabilidade possui uma vertente que possibilita seletar adequadamente o método de manutenção, tendo em conta as condições e o tempo em que opera a máquina. Por isso, importa considerar os seguintes conceitos:

- TO – Tempo em Operação
- TS – Tempo em Standby (pronto a operar)
- TC – Tempo em Manutenção Corretiva
- TP – Tempo em Manutenção Preventiva
- NB – Número de Bens observados
- NA – Número de Avarias

- MTBF – *Mean Time Between Failures*
- MTTF - *Mean Time to Failures*
- MTTR - *Mean Time to Repair*

Em geral, a fiabilidade é obtida através dos testes realizados anteriormente. Estes testes são realizados em materiais idênticos ao longo do seu ciclo de vida. Sendo que também se pode obter a fiabilidade de um sistema através da fiabilidade das suas partes. (NP 13306, 2018)

Capítulo III

Controlo de Condição

Neste terceiro capítulo serão apresentados os princípios fundamentais relacionados com o Controlo de Condição, tema principal da elaboração desta tese.

3.1. Conceito

Como mencionado anteriormente, o Controlo de Condição é a Manutenção Preventiva Condicionada, também conhecida como Manutenção Preventiva por Avaliação. Com este tipo de manutenção procura-se diminuir o tempo e a dificuldade das rotinas de maior duração e complexidade, promovendo também redução nos custos e na mão de obra. Pelos mesmos e/ou menos custos, este tipo de manutenção busca aumentar as prestações de cada sobresselente ou artigo de substituição de um equipamento. (Sampaio, 2021)

Para manter um controlo de qualidade constante sobre o estado real dos equipamentos, é necessário garantir que os equipamentos e os seus componentes sejam apenas substituídos no fim da sua vida útil, através das indicações fornecidas pelas técnicas de diagnóstico. (Sampaio, 2021)

A Manutenção Preventiva por Avaliação assenta-se na utilização de alguns métodos de diagnóstico, geralmente com os equipamentos a funcionar. Através das técnicas de diagnóstico procura-se identificar indícios que acusem a existência de irregularidades ou padrões anormais num estado precoce de desenvolvimento. (Sampaio, 2021)

Dada a diversidade dos componentes a conferir e a complexidade dos sintomas possíveis de identificar, existe uma gama de técnicas de diagnósticos. Assim sendo, as tecnologias envolvidas e as características dos equipamentos existentes serão imprescindíveis para estimar os métodos adequados ao seu controlo. (Sampaio, 2021)

As técnicas de diagnóstico podem ser de primeiro diagnóstico ou de diagnóstico analítico. Sendo que as de primeiro diagnóstico, geralmente são do âmbito do 1º escalão, pois utilizam sobretudo instrumentos de fácil utilização, associados ou não aos equipamentos, os quais apresentam uma primeira indicação da alteração dos parâmetros. (Sampaio, 2021)

Já as de diagnóstico analítico são aplicadas com uma periodicidade mais longa, por isso, envolvem meios que envolvem os três escalões, pois recorrem a equipamentos mais complexos e que explicam mais detalhadamente as anomalias relacionando-as com as causas, por forma a identificar um sintoma previamente

detetado numa inspeção (Sampaio, 2021)

3.2. Definição do Controlo de Condição

É o método manual ou automático de determinação da condição das máquinas e estruturas, enquanto em funcionamento, por forma a prever, estimar e programar a reparação mais eficiente antes da ocorrência da falha. Este modo de manutenção evita esforços não programados e prejuízos elevados de paragens inesperadas, ajuda também a conhecer antecipadamente as necessidades e os sobresselentes úteis para uma gestão mais eficaz do pessoal e o planeamento de reparações no momento adequado. (Sampaio, 2021)

3.3. Objetivos principais

O principal objetivo da Manutenção Condicionada, ou seja, Controlo de Condição, é facilitar informação atualizada sobre o estado dos equipamentos e do conjunto, bem como a identificar com rigor os danos na sua fase mais inicial, por forma a evitar a falha comprometedora. (Sampaio, 2021)

3.4. Vantagens e Benefícios

Alguns dos principais benefícios da implementação do Controlo de Condição podem ser:

- Menos custos de manutenção;
- Maior disponibilidade dos equipamentos e da instalação;
- Maior renda devido ao aumento da disponibilidade dos equipamentos e da instalação;
- Melhoria e aumento da fiabilidade dos materiais e conjunto em que se insere;
- Maior desempenho dos equipamentos e da instalação em geral;
- Maior produção e melhor qualidade de funcionamento;
- Manutenção mais bem organizada e estruturada;
- Menor probabilidade da avaria.

3.5. Tipos de Controlo de Condição

O controlo de condição pode ser aplicado tanto a máquinas como em estruturas, sendo que para estruturas denomina-se *Structural Health Monitoring* (SHM) e para máquinas denomina-se *Condition Monitoring* (CM); ver figura 5.

3.5.1. Structural Health Monitoring

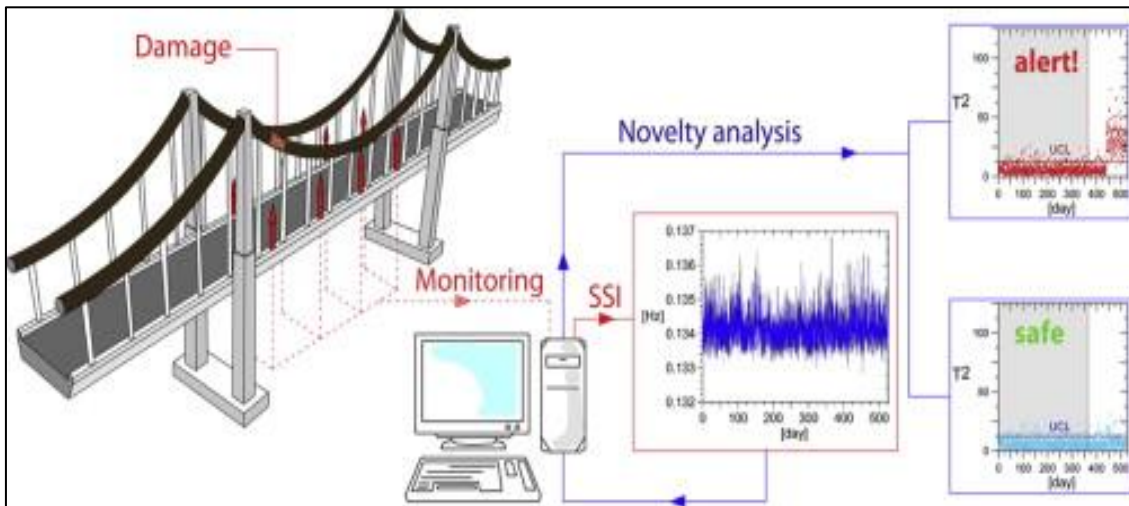


Figura 5 Structural Health Monitoring, (Google, s.d.)

Relativamente ao SHM, nos dias correntes tem realizado técnicas de elevados custos como por exemplo a termografias, testes de ultrassons, correntes Eddy, raios gama e estas técnicas estão direcionadas para a análise de vibrações e de fibra ótica, isto porque a análise de vibrações requiere técnicas mais práticas e apresentam menos custos relativamente aos anteriores, o que viabiliza uma exploração continua.

Para as estruturas, a aplicabilidade requiere um orçamento maior em relação as máquinas. Normalmente, o SHM aplica-se a pontes, edifícios, aeronaves, navios e mais, sendo que a maior parte dos problemas são degradações de ligações, ressonância, isolamento e incomodidade.

3.5.2. Condition Monitoring

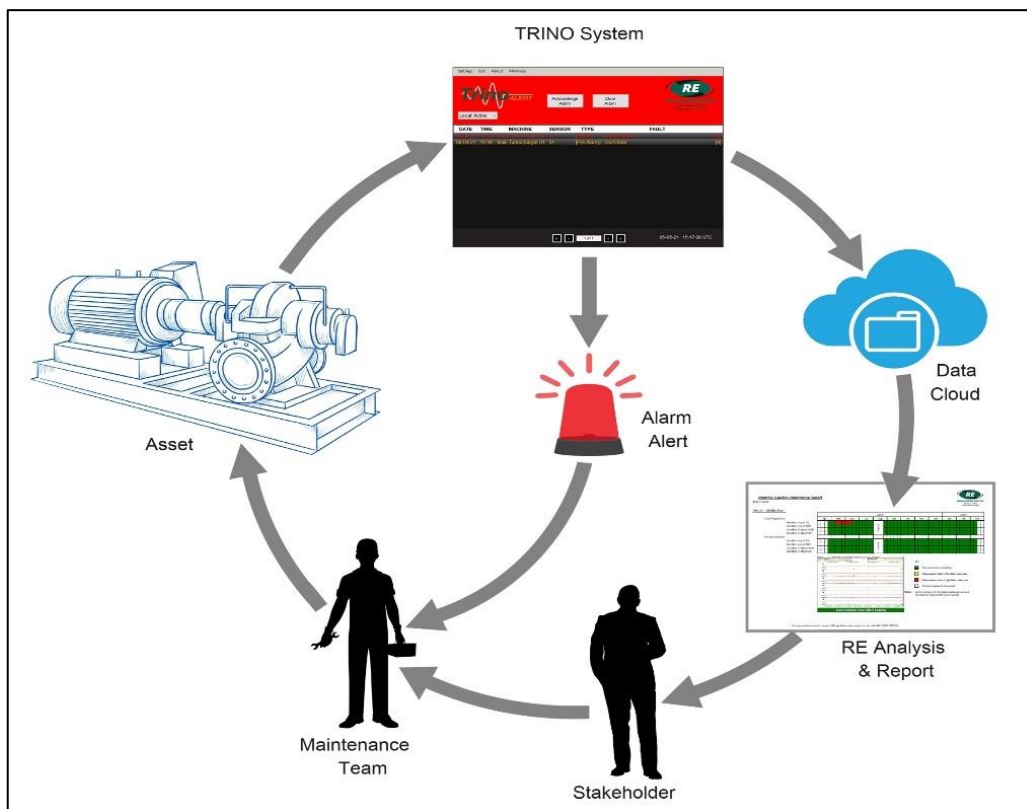


Figura 6 Condition Monitoring, (Regulateur Europa, 2018)

Por outro lado, o *Condition Monitoring* oferece maior facilidade nas suas ferramentas. Atualmente, o mundo industrial tem optado por apostar mais no método aplicado as máquinas, isto porque independentemente dos custos baixos, existe uma maior aplicabilidade do CM em relação ao SHM devido ao elevado número de máquinas parecidas.

Esta técnica é mais fácil e as medições não apresentam grandes dificuldades, o que faz com que não se necessite propriamente de pessoal especializado. No entanto existe muito pessoal com experiência nesta área.

Para o CM, nos dias de hoje as técnicas mais utilizadas são: termografia, parâmetro processuais, inspeção visual, análise de vibrações, testes de ultrassons, análise de corrente, etc. A maior parte dos problemas encontrado em máquinas são desequilíbrios, desalinhamentos, empenos, ressonâncias e cavitação.

Descrição inicial

A identificação da anomalia é realizada de formas distintas e utilizam recursos diferentes:

- A fase da deteção (saber se há avaria);
- A fase do diagnóstico.

Deteção

A fase da deteção é relativamente mais simples e necessita de menos recursos, por isso os meios técnicos associados são reduzidos. O programa é mais simples e fácil de ser implementado e relativamente ao pessoal responsável por executar, estes não necessitam de formação especializada.

Esta fase é responsável pela confirmação da existência de anomalias. E tanto os testes como as medições de avaliação de condição, são não destrutivas e podem ser executadas periodicamente e continuamente, por forma a obter toda a informação sobre a condição ou o estado das máquinas e das estruturas, enquanto em funcionamento. (Sampaio, 2021)

Diagnostico

Esta fase já é mais densa e complexa, porque necessita de operadores com formações especializadas, por forma a interpretar dinamicamente os dados recolhidos. Os meios técnicos são mais desenvolvidos e as técnicas de medição são mais sofisticadas. Diferentes da fase de deteção, esta não só confirma a existência da anomalia, como determina dados específicos como:

- O local onde se encontra a avaria;
- O tipo de avaria;
- A gravidade da avaria.

A fase de diagnostico por ser mais complexa, acaba por necessitar de mais atenção na identificação da anomalia, é necessário perceber que após realizado o diagnóstico, torna essencial arranjar uma solução válida para o problema, isto porque, a má realização do diagnostico viabiliza a realização imprópria de manutenção, o que pode ampliar a gravidade da situação.

Dada as condições disponíveis para a realização deste trabalho, decidiu-se

numa fase inicial estudar e desenvolver apenas a fase de detecção, visto que é mais simples e requiere um orçamento mais baixo.

Capítulo IV

Vibração

Neste quarto capítulo serão apresentados os princípios fundamentais relacionados Vibração. Para tal será abordado a teoria de medição, com principal ênfase na Análise de vibrações e logo depois, as metodologias de implementação de um programa de Controle de Condição.

4.1. Conceito

A vibração é o movimento ou a oscilação mecânica de uma máquina ou um componente em torno de uma posição de equilíbrio.

4.2. Tipos de Vibração

A vibração pode se comportar de várias formas, sendo que os principais são respectivamente:

- periodicamente, ou aleatoriamente, sendo que a vibração periódica se repete periodicamente ao longo do tempo e a vibração aleatória, não.
- Livrementemente ou sujeita a forças externas, sendo que a livre, depende da força externa apenas para considerar as condições iniciais e a forçada não, pois depende das forças externas para manter o desenvolvimento.
- Amortecida e não amortecida, sendo que a amortecida possui amortecimento e a não amortecida não possui.

Vibração Periódica

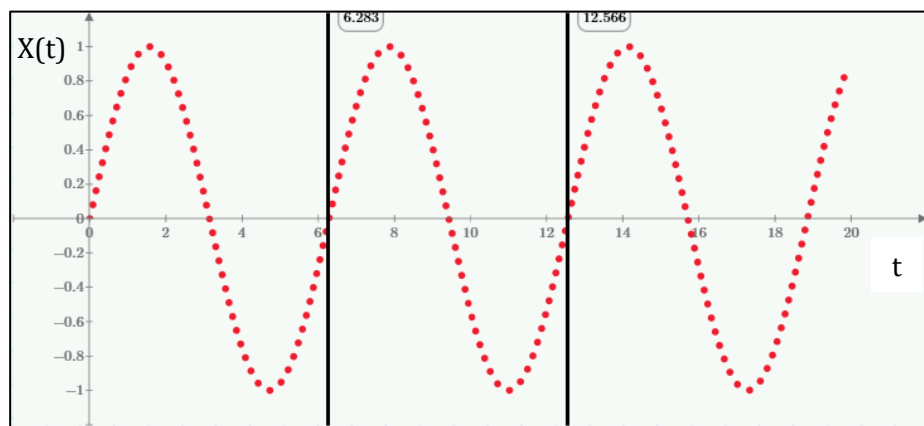


Figura 7 Vibração Periódica, elaboração própria. Elaboração própria.

A vibração periódica compreende um comportamento repetido ao longo do seu desenvolvimento, ou seja, repete-se ao longo dos períodos; ver a figura 7.

Vibração Aleatória

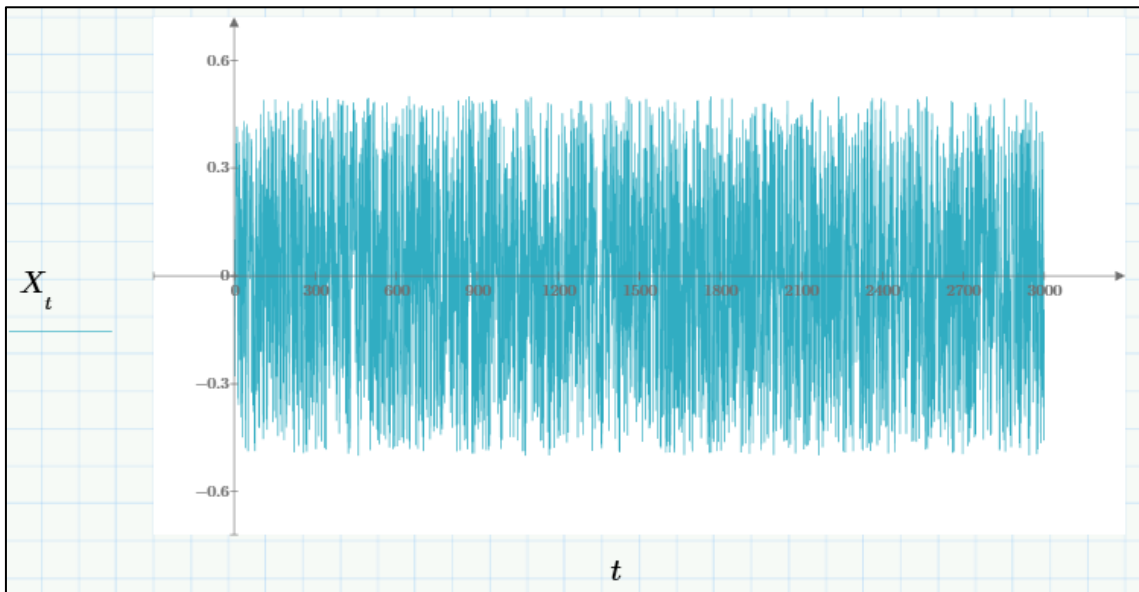


Figura 8 Vibração Aleatória. Elaboração própria.

Em geral a vibração é medida em aceleração, porém pode-se converter tanto para velocidade como para deslocamento.

Um objeto, ou uma estrutura pode vibrar de duas maneiras, livre ou forçada.

Vibração Livre

A vibração livre é a vibração desenvolvida, após uma perturbação inicial, sem a presença de forças externas.

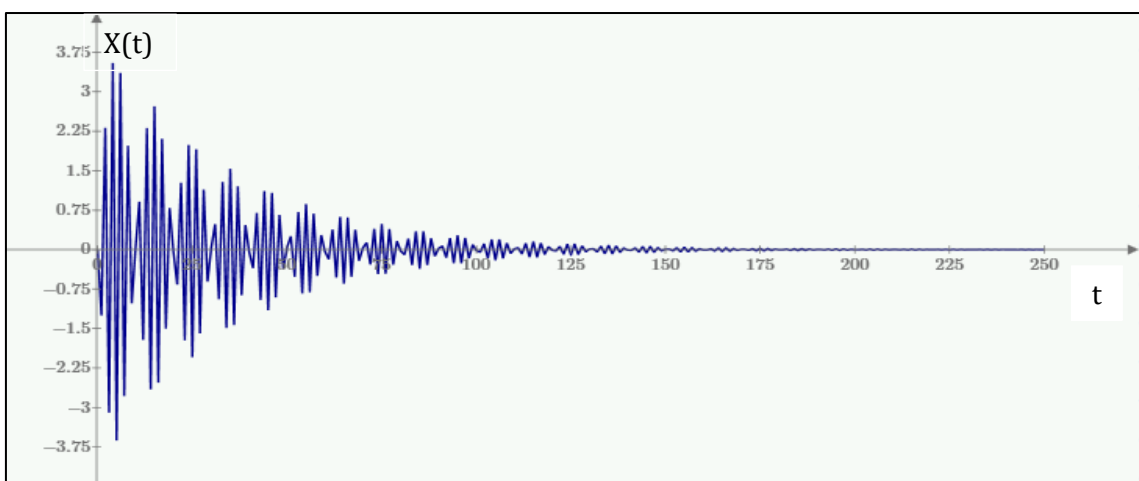


Figura 9 Vibração livre, elaboração própria.

Vibração Forçada

Chama-se de vibração forçada ao sistema excitado por forças externas, ou seja, depende de energia externa fornecida diretamente ao sistema durante a vibração. Geralmente a energia fornecida ao sistema pode ser por meio de uma força dinâmica aplicada.

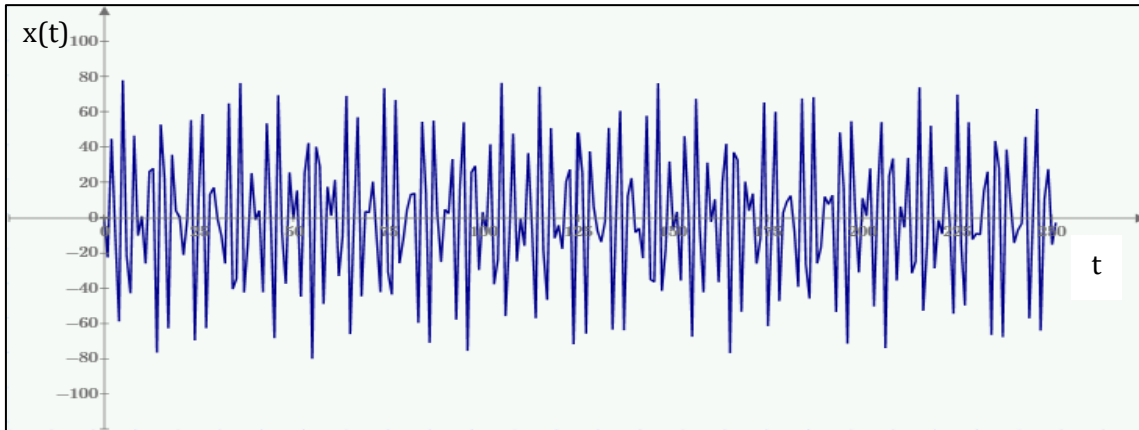


Figura 10 Vibração Forçada, elaboração própria

É importante perceber que a vibração forçada, pode ser aleatória ou periódica.

Vibração Amortecida

É dada quando, energia de qualquer natureza é perdida na realização da oscilação, por razões de atrito o por outra força qualquer. Normalmente a vibração livre acaba por ser uma vibração amortecida, isto porque ao decorrer da oscilação existe uma diminuição da amplitude.

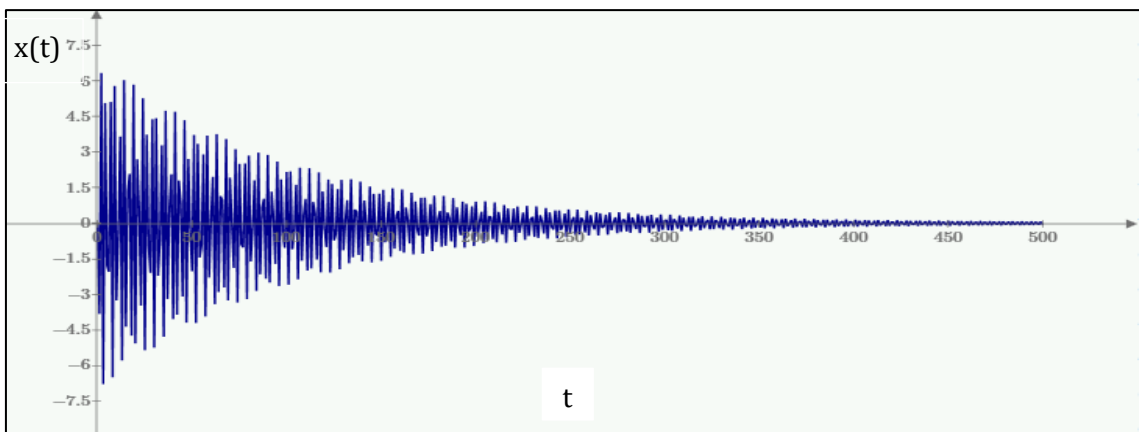


Figura 11 Vibração amortecida

Vibração não Amortecida

Este tipo de vibração acontece quando ao longo do seu desenvolvimento, não existe perde ou dissipação de energia, nem por atrito ou por outra resistência qualquer.

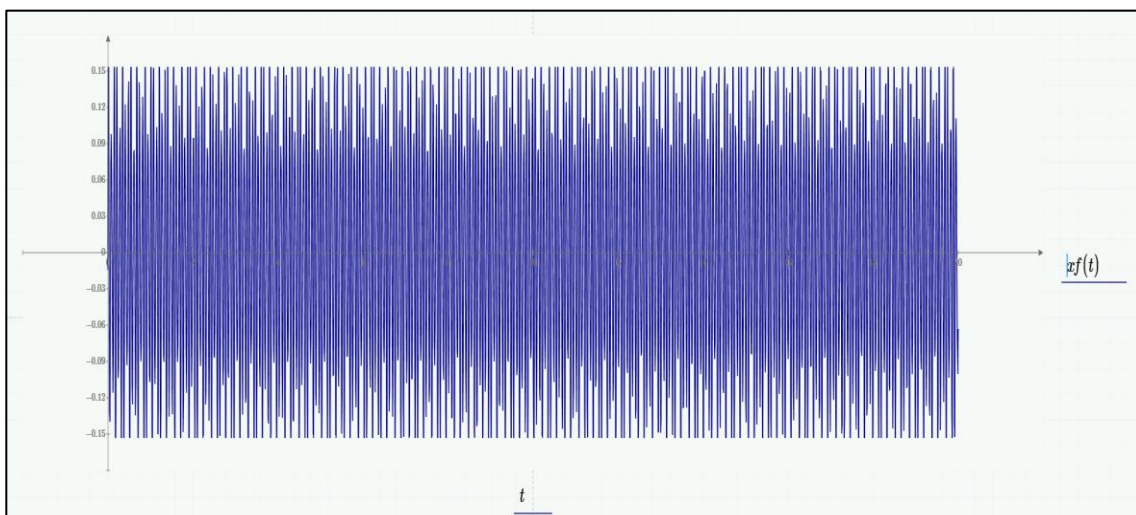


Figura 12 Vibração não amortecida, elaboração própria

4.3. Análise de Vibrações

No âmbito de análise de vibrações, é importante referir que a vibração está presente em quase tudo que existe. Em alguns momentos essa afirmação é perceptível e em outros nem tanto. Relativamente a este tema, tudo é determinado respondendo as seguintes questões, ‘como medir?’, ‘o que fazer como os resultados medidos?’, ‘como perceber o real significado de cada leitura?’. Um facto, é que todas as máquinas rotativas e alternativas possuem uma vibração única. Cada equipamento possui o seu tipo específico de leitura, o que facilita a percepção de padrões diferentes, caso haja anomalias.

Tanto em engrenagens como em rolamentos, ou chumaceiras, ou até mesmo em equipamentos compostos por muitos acessórios, possuem um tipo de leitura específico. E caso haja alterações nos parâmetros normais, é possível detetar a diferença entre a leitura padrão e a leitura com anomalia. A análise de vibração indica com exatidão o estado dos equipamentos, porque apesar de algumas máquinas serem constituídas por muitos componentes, é possível perceber o funcionamento interno das máquinas.

Da mesma maneira que é possível diferenciar o tipo de anomalia baseando-se na análise do som de cada equipamento, é também possível diferenciar o tipo de

anomalia baseando-se no comportamento vibratório de cada equipamento. E mesmo quando uma leitura colmata inúmeros equipamentos, consegue-se repartir individualmente a leitura e assim ser capaz de perceber o padrão atual de cada equipamento.

Os rolamentos apresentam uma leitura diferente de um problema de desalinhamento ou de desequilíbrio, do mesmo jeito que um problema nos carretos apresenta uma leitura diferente de um problema de cavitação. Até mesmo entre as diferentes partes do rolamento possuem leituras diferentes, o que permite localizar com exatidão a avaria. E por mais difícil que seja a percepção destas diferenças, é possível, através de equipamentos adequados, localizar a anomalia. Cada sinal, por mais simples que seja, possui uma amplitude e uma frequência única e caso haja avaria, a vibração aumentará essa amplitude e assim por diante.

Com a evolução da tecnologia, existem aparelhos portáteis que facilitam a realização de aquisição de dados. Aparelhos estes que convertem a vibração em sinal elétrico. E por ser portátil viabiliza também o dinamismo do trabalho, fazendo com que a medição se torne rápida e eficiente.

As máquinas vibram por inúmeras razões, por exemplo os veios, os rotores, os rolamentos, e visto que em maior parte das vezes as medições são mais realizadas nas chumaceiras, esta medição será sempre afetada por todo o conjunto de equipamento associado a esta chumaceira. É importante medir nos 3 eixos, pois cada um dos eixos representa uma frequência diferente e/ou pode acontecer que a avaria apenas se desenvolva em um eixo específico. Pode-se também medir no motor, nas bombas e em mais pontos. Com o sensor que converte a vibração detetada em sinal elétrico pode-se enviar esse sinal para um aparelho portátil de fácil utilização.

Uma das formas mais fáceis de fazer a leitura de um sinal de vibração chama-se de espectro, uma maneira sofisticada de representar em frequência o mesmo sinal que foi anteriormente representado em tempo. Já é mais perceptível que uma avaria causa uma vibração diferente da normal e caso essa vibração aumente, a amplitude também aumentará. Na análise de espectro de frequência, esta diferença é mais notada. E as avarias são distinguidas com maior precisão. Também é possível com a análise do espectro frequência, estimar a gravidade da avaria, e assim consegue-se selecionar de acordo com as necessidades e/ou prioridade dos problemas, as

soluções adequadas ao momento.

Infelizmente, é tudo muito mais complicado na realidade. Normalmente a leitura feita, é de um combinado de equipamentos, que podem ou não possuir mais equipamentos interiores. Daí a necessidade de pessoal minimamente especializado na área, para a realização deste tipo de trabalho.

4.3.1. Aquisição e Processamento de Sinal

O processo de aquisição e processamento de sinal é usado para a recolha e monitorização de parâmetros. Em geral os sistemas usados neste processo são normalmente:

- Sensor (Transdutor)



Figura 13 Transdutor de vibração mecânica (Tecnologia, 2021)

- Condicionador de Sinal

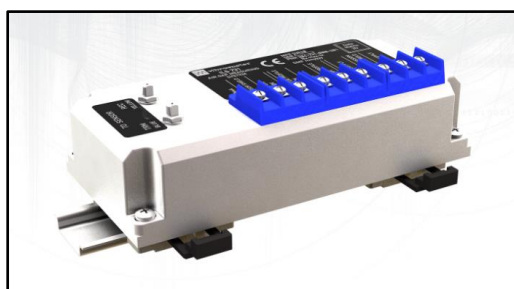


Figura 14 Condicionador de Sinal (MEGGITT SA, 2021)

- Placa de aquisição de dados



Figura 15 Placa de aquisição de dados, (National instruments, 2021)

- Computador



Figura 16 Computador. (Sampaio, 2021)

Atualmente, existem aparelhos adequados que realizam as funções de todos os equipamentos mencionados anteriormente. E com isso, é possível com um só equipamento fazer a leitura das vibrações das máquinas e interpretar os dados recolhidos por forma a perceber o estado da máquina.

Como abordado anteriormente, cada um destes aparelhos possui funções específicas. Sendo que alguns viabilizam a aquisição e outros o processamento. A limitação tecnológica faz com que seja impossível adquirir na totalidade os infinitos valores que os sinais analógicos e contínuos no tempo possuem, sendo apenas possível recolher uma amostra destes valores. (Sampaio, 2021)

Basicamente, na recolha dos dados, são recolhidos N pontos durante um determinado período T , designado por período de amostragem. E é chamada de

frequência de amostragem ***fa*** a relação entre os números de pontos recolhidos e o período de amostragem.

$$fa = \frac{N}{T}$$

Fórmula 1 Frequência de amostragem

A placa de aquisição adquire pontos de forma discreta. E é chamado de resolução no tempo ***dt*** ao período entre as aquisições dos pontos. Este valor pode ser dado como o inverso da frequência de amostragem, o que seria equivalente a relação entre o período de amostragem e o número de pontos recolhidos.

$$dt = \frac{1}{fa}$$

Fórmula 2, Resolução no tempo

$$dt = \frac{T}{N}$$

Fórmula 3, Resolução no tempo

É importante que se tenha o mínimo de conhecimento prévio daquilo que se pretende adquirir ao realizar a aquisição de um sinal. Deve-se ter a noção do quão rápido o sinal pode variar com o tempo e também, ser capaz de perceber as frequências presentes no mesmo, pois, facilita bastante o processo de aquisição e processamento de sinal, principalmente no *Condition Monitoring*.

Existe também a frequência máxima que pode ser obtida através da frequência de amostragem. Pois a frequência máxima nunca pode ser superior a metade da frequência de amostragem.

$$fmáx = \frac{fa}{2}$$

Fórmula 4, Frequência máxima.

$$fmáx = \frac{N}{2T}$$

Fórmula 5, Frequência máxima

Relativamente ao processamento de sinal, este é um processo de alterações e procedimentos aplicados aos dados adquiridos, de modo a revelar a informação nela contida, isto porque os dados são maioritariamente complexos e difíceis de

serem interpretados. Procedimentos estes que dependem fundamentalmente de transformações matemáticas, reveladas em forma de técnicas digitais. (Sampaio, 2021)

Atualmente é possível realizar a visualização de dados que apresentam maiores complexidades; ver as figuras 17, 18 e 19.

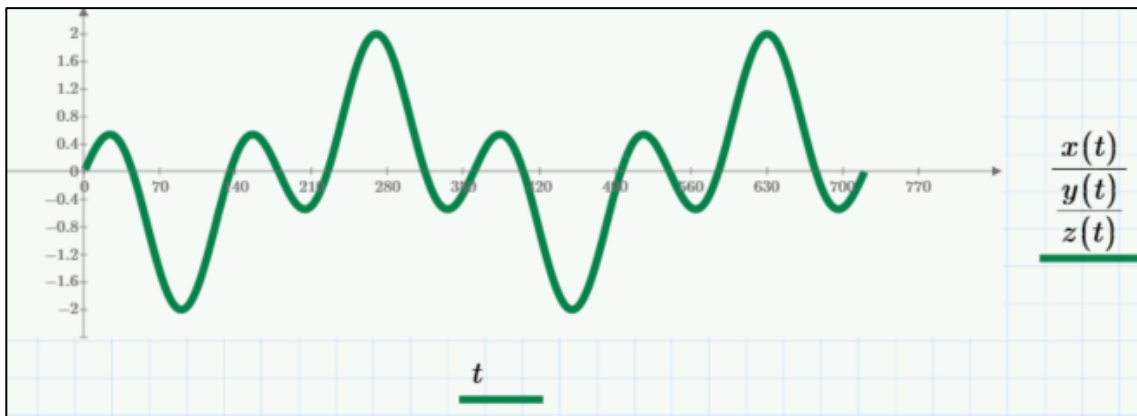


Figura 17 Resposta em posição no domínio do tempo. Elaboração própria.



Figura 18 Soma de harmônicas. elaboração própria.

Neste exemplo a amplitude máxima das três funções é a mesma, mas a decomposição de uma vibração composta também é igualmente aplicada em funções de amplitudes e de fases diferentes.

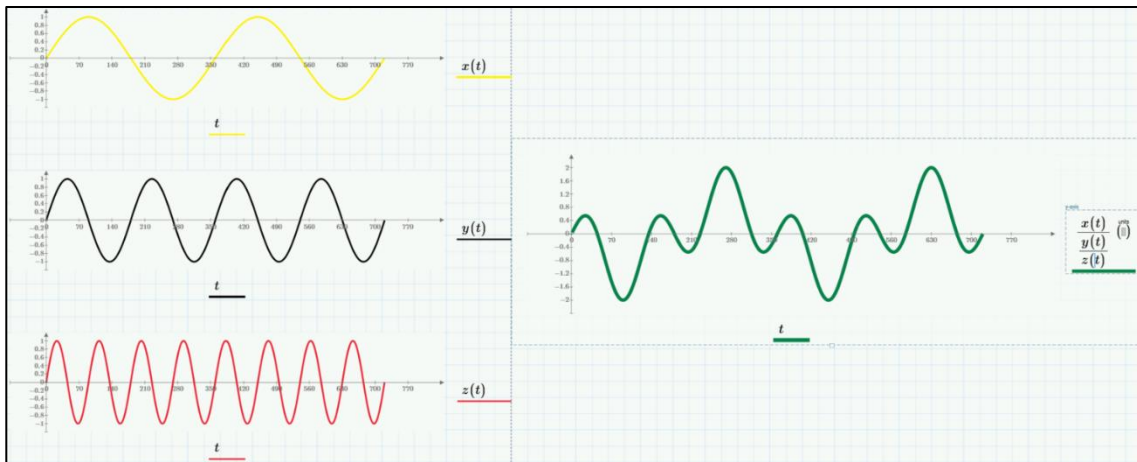


Figura 19, Soma de harmônicas, Elaboração própria.

Para a análise em frequência, os sinais no domínio do tempo são transformados para o domínio da frequência. Como todas as vibrações compostas, são constituídas por vibrações harmônicas, o domínio da frequência visa apresentar detalhadamente as frequências associadas a estas harmônicas; (Mac Tutor, 1807) ver figura 20.

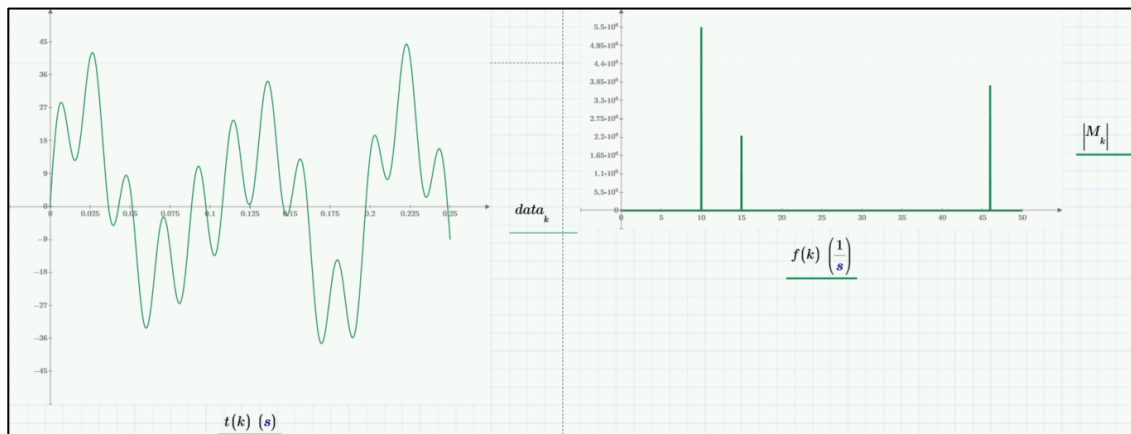


Figura 20, Domínio do tempo para o domínio da frequência. Elaboração própria.

Ao passar para o domínio da frequência também é possível visualizar as frequências dominantes do sistema, que no exemplo mostrado na figura anterior é a primeira.

Por mais que a vibração de um sistema seja afetada por várias fontes de vibração, a fonte com maior amplitude será sempre a mais dominante. E a proporcionalidade torna-se cada vez mais notável com o aumento desta amplitude.

Nota que apesar deste processo facilitar muito mais a visualização dos dados a resposta no domínio do tempo e a resposta no domínio da frequência

complementam-se, apenas são formas distintas de visualizar os mesmos dados. O que disponibiliza o máximo de detalhe da resposta e simplifica não só o sistema, como também o processo de tomada de decisão do operador.

Leakage

Quando se faz a FFT (*Fast Fourier Transform*) para passar um sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência, FFT considera por definição os sinais como periódicos. No entanto, em maior parte das vezes, a vibração real das máquinas apesar de periódica é normalmente composta por variadas contribuições a diferentes frequências e fases. Ou seja, nada garante que ao medir a vibração da máquina, o período de amostragem escolhido para o sensor coincida com o número inteiro de ciclos desta máquina. Tal acontecimento é denominado de “erro de *Leakage (Windowing)*”, em que se pode evitar ajustando e processando o sinal original através de janelas com formas apropriadas.

Caso o sinal processado pela FFT corresponder a parte integrante (contempla um número inteiro de períodos) do sinal periódico, não há necessidade de aplicar qualquer janela.

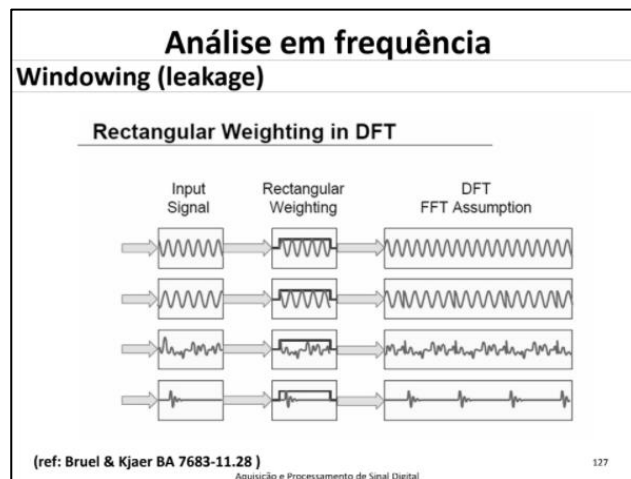


Figura 21 Janela Retangular, Chedas Sampaio

Caso o sinal não seja periódico a FFT tenta moldar as descontinuidades através de outras ondas sinusoidais, originando um espectro de frequência com várias frequências de amplitude reduzida independentemente da frequência

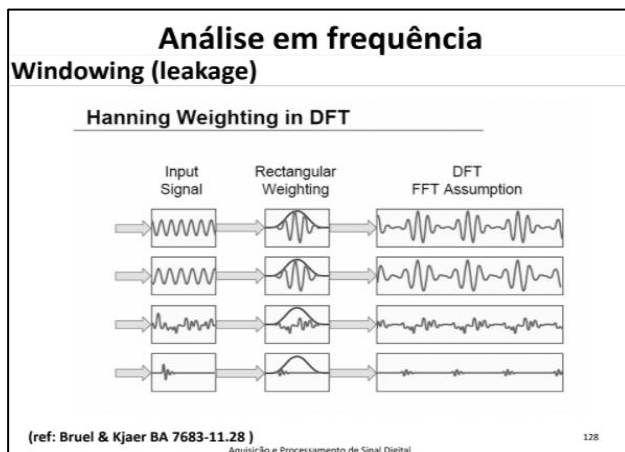


Figura 22 Janela de Hanning, (Sampaio, 2021)

correspondente ao sinal. Uma solução para este tipo de ocorrência é a aplicação de uma janela *Hanning*. A janela de *Hanning* minimiza o sinal nas suas extremidades removendo as descontinuidades e aproximando-o de um sinal periódico. (Ostrava, 2012)

As janelas Retangular e *Hanning* são as mais comuns. Contudo, existem outras, cada uma correspondendo a um propósito específico.

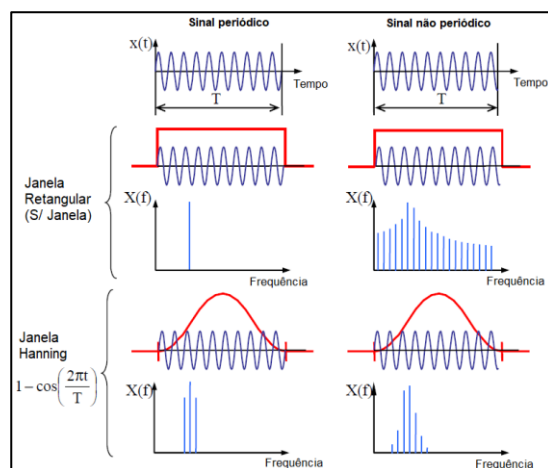


Figura 23 Princípio de Leakage e aplicação de Janelas. (Fernandes, 2019)

Aliasing

A frequência máxima ou a frequência de *Nyquist* valida a teoria de *Claude Shannon* e *Harry Nyquist* em que para não se perder informações contidas em sinais amostrados, é necessário que a frequência de leitura ou de amostragem seja no

mínimo o dobro da frequência máxima contida neste sinal.

Aliasing é o erro que ocorre quando a frequência de amostragem não é suficiente para capturar realisticamente um sinal e por isso existe possibilidade de frequência altas poderem ser confundidas por frequências pequenas.

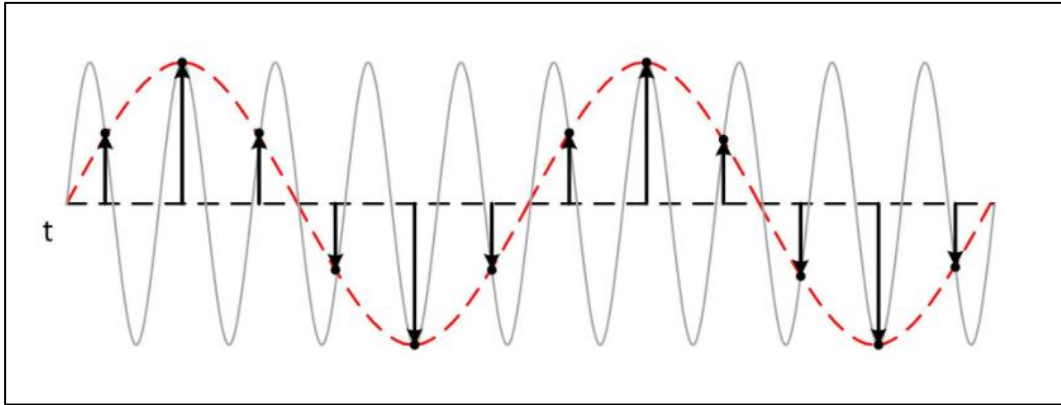


Figura 24 Aliasing provocado por uma taxa de amostragem relativamente baixa, (Instruments, 2021)

O *Aliasing* traduz-se na existência de uma constituinte de alta frequência que adota a similaridade de uma componente de baixa frequência, alterando o espectro do sinal original e criando uma mistura indistinguível entre os componentes reais de baixa frequência. E isto acontece quando a componente de alta frequência é superior frequência de *Nyquist*.

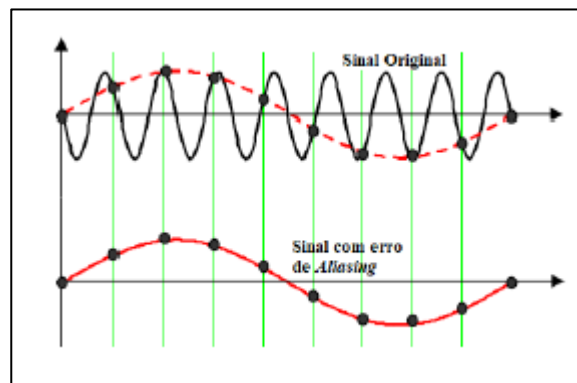


Figura 25 Princípio de Aliasing, (F. Duan, "Diagnostics of Rotor and Stator Problems in Industrial Induction Motors, s.d.)

Este tipo de ocorrência pode ser evitado recorrendo-se à aplicação de um filtro anti-aliasing (filtro passa-baixa) antes do condicionamento de sinal, de modo a atenuar componentes de alta frequência que se encontrem fora da margem de

interesse e ao uso de uma frequência de amostragem adequada.

Um filtro anti-aliasing elimina frequências superiores a frequência de *Nyquist* do sinal original. Ou seja, a metade da frequência de amostragem $\frac{f_a}{2}$. Contudo, devido aos filtros anti-aliasing e ao fenómeno de *roll-off* presente nos mesmos só podem ser corretamente identificadas, frequências que assumem valores até $\frac{f_a}{2.56}$.

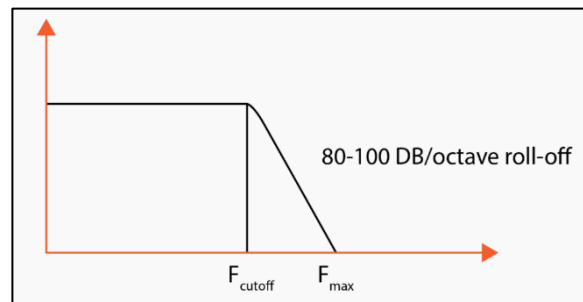


Figura 26 Filtro Anti-aliasing com efeito Roll-Off,

No intervalo entre $[\frac{f_a}{2.56}; \frac{f_a}{2}]$ as frequências sofrem alterações nas suas amplitudes. Fazendo com estas não sejam consideráveis, por não serem viáveis.

4.3.2. Metodologia de Implementação do Programa

Para uma implementação da instalação segura, estruturada e configurada deve-se ter em conta preocupações e inquietações. Existem muitos fatores que podem afetar negativamente a instalação deste tipo de sistema, por isso é necessário que se tenha tudo muito organizado e programado. (Marinha Portuguesa, 1998) Existem 4 grandes etapas a serem desenvolvidas, e estas são nomeadamente:

- Estudo da instalação
- Seleção das máquinas
- Seleção das técnicas
- Finalização da implementação do programa

Estudo da Instalação

É também importante realizar o estudo da instalação, na qual os fatores principais a ter em conta, são a segurança do pessoal associado, segurança do material e da instalação, segurança ambiental, disponibilidade da instalação, fiabilidade dos sistemas e máquinas, dos manutenibilidade dos equipamentos, viabilidade económica, legislação e seguros, o nível de segurança exigido para o pessoal, o material as instalações e o ambiente, a taxa de disponibilidade pretendida

para os equipamentos e sistemas, investimentos previsto e perspectivas de retorno, custos admissíveis. Estes estudos são baseados em critérios e objetivos definidos pela política de gestão integrada da empresa. (Marinha Portuguesa, 1998)

Seleção das Máquinas

Nesta etapa, deverão ser selecionadas as máquinas que necessitem de intervenção, nomeadamente as máquinas que afetem a segurança do pessoal, do material ou até da instalação em geral, máquinas críticas para a produção, máquinas caras, com elevados custos e que afetam direta e indiretamente a manutenção. Na fase inicial, o número de máquinas deve ser reduzido por forma a facilitar o processo de iniciação. (Sampaio, 2021)

Seleção das Técnicas

Na seleção das técnicas aconselha-se a determinação dos modos de anomalia/falha das máquinas selecionadas, a determinação das relações entre o custo e a eficácia para cada técnica ou combinações de técnicas, a seleção de uma técnica principal ou a combinação de várias técnicas, no entanto esta técnica não é recomendável, pois requiere um grande investimento inicial. Contudo deve-se validar a possibilidade de contratar especialistas. Usualmente a técnica mais selecionada é baseada na análise de vibrações. (Sampaio, 2021)

Efetivação da Implementação do Programa

Esta etapa serve para concretizar as ideias iniciais, por isso deverá se reunir todas técnicas consideradas nas etapas anteriores. O programa deve cumprir com os princípios de um planeamento de inspeções. Ou seja, deve possuir um circuito de informação, uma FIT, onde estarão inclusas as periodicidades, as condições de funcionamento, os dados do pessoal e os dados da execução do programa. Deve também conter uma base de dados com os valores de referência por forma a definir alarmes de alerta e perigo. (Sampaio, 2021)

4.4. Limites de Vibrações

Atualmente existem Sociedades classificadoras e Normas em todo mundo, trabalhando em atualizações tecnológicas com sistemas de qualidade que promovem o rigor. Isso para que se consiga melhor forma de analisar as máquinas.

Não existe propriamente uma melhor Norma, isto porque apesar das Normas e as Sociedades classificadoras terem o mesmo objetivo, existem diferenças nas particularidades que as definem.

As Normas ISO (*International Organization for Standardization*) são reconhecidas internacionalmente, tendo servido de base para a criação das regras de outras Normas. Para a elaboração deste trabalho, ter-se-á como base algumas Normas, principalmente a ISO 10816, uma Norma atualmente usada na análise de vibrações em máquinas da Marinha Portuguesa. A ISO 20816 está subdividida em diversas partes, nomeadamente:

- Norma ISO 10816-1: Diretrizes gerais;
- Norma ISO 10816-2: Turbinas e geradores a vapor terrestres de potência superior a 50 MW com velocidades normais de funcionamento de 1500 RPM, 1 800 RPM, 3 000 RPM e 3 600 RPM;
- Norma ISO 10816-3: Máquinas industriais com potência nominal acima de 15KW e velocidades nominais entre 120 RPM e 15000 RPM quando medidas no local;
- Norma ISO 10816-4: Conjuntos de turbinas a gás com rolamentos de película fluida, exceto derivados de aeronaves;
- Norma ISO 10816-5: Conjuntos de máquinas em instalações de produção e bombagem de energia hidráulica;
- Norma ISO 10816-6: Máquinas alternativas com potências superiores a 100 kW;
- Norma ISO 10816-7: Bombas rotativas para aplicações industriais, incluindo medições em veios rotativos;
- Norma ISO 10816-8: Sistemas de compressores alternativos.

De acordo com esta Norma, a amplitude da vibração é definida, em geral, em velocidade (mms/s) RMS na banda de frequência, em grande parte compreendida num intervalo entre 10 e 1000 Hz.

Outra Norma muito reconhecida e utilizada atualmente é a ABS (American

Bureau of Shipping). Esta Norma é referente a vibrações mecânicas de equipamentos a bordo dos navios da Marinha de Guerra Americana.

Relativamente a vibrações nos navios, a ABS estipula especificações e orientações sobre os requisitos principais. Nomeadamente:

- Projeto;
- Análise;
- Procedimentos;
- critérios de medição;

A Norma fornece critérios de níveis aceitáveis de vibração que compreendem três áreas.

- Limites de vibração para tripulação e passageiros;
- Limites de vibração para estruturas locais;
- Limites de vibração para máquinas.

De acordo com esta Norma, a amplitude da vibração também é definida, em geral, em velocidade (*mms/s*) RMS na banda de frequência, em grande parte compreendida num intervalo entre 1 e 1000 Hz.

Por fim, também será tido como base, para a elaboração deste trabalho, a Norma DNV-GL (*Det Norske Veritas – Germanischer Lloyd*). Esta Norma foi inicialmente criada pelos noruegueses, e atualmente existe uma cooperação por parte dos alemães.

O seu objetivo consiste em estudar 3 características de um navio, nomeadamente:

- COMFORT CLASS - COMFORT (Conforto);
- VIBRATION CLASS - VIBR (Vibração);
- SAFE WORKING CONDITIONS IN CONTAINER SECURING OPERATIONS - SAFELASH (condições seguras de trabalho em operações de segurança em contentores).

De acordo com esta Norma, a amplitude da vibração é definida em velocidade

(mm/s) RMS na banda de frequência, em grande parte compreendida num intervalo entre 4 e 200 Hz.

É efetuada uma avaliação geral do navio antes das medições, com o objetivo de divulgar as posições críticas e preencher a lista com as posições, juntamente com os correspondentes limites de vibração (denominada de protocolo). O protocolo deve conter os requisitos apresentados na figura 13, por forma a que a notação classe VIBR seja atribuída ao navio, mas apenas se todas as posições medidas estiverem compreendidas nos limites estipulados.

<i>System</i>	<i>Position</i>	<i>Checked</i>	<i>Limit [mm/s]</i>	<i>Measured [mm/s]</i>	<i>Max. Ampl./Freq.* mm/s / [Hz]</i>	<i>Comment</i>

* Only to be given when the vibration criterion is exceeded.

System is the main machinery group

Position is the actual measuring position

Checked some position may only be checked without further measurements

Limit is the predefined limit for the actual position

Measured is the r.m.s. vibration level measured at the actual position

Max. ampl./freq. is the maximum vibration component and the corresponding frequency

Frequency is the frequency corresponding to a specific vibration component

Figura 27 Tabela com o protocolo de medição de vibração para navios. DNV GL

Capítulo V

Elaboração do Programa

Neste capítulo é realizado o desenvolvimento do programa de manutenção a ser aplicado na Marinha de São Tomé e Príncipe. Para tal, será ilustrado primeiramente a metodologia de elaboração e de seguida os resultados obtidos.

5.1. Metodologias

5.1.1. Descrição da Ideia Inicial

O método a ser elaborado será de fácil interpretação e uso, o que possibilitará a execução porque não necessitará propriamente de pessoal qualificado. Este método reúne ferramentas baratas e de fácil acesso, por forma a facilitar a sua aquisição à Marinha de São Tomé e Príncipe.

O país é definido por possuir embarcações pequenas e sobretudo com motores fora de bordo. No geral esta Marinha possui botes e semirrigidas, exceto o navio catamaran 'Príncipe' que garante o transporte de pessoas entre as duas ilhas. Os navios pequenos são geralmente utilizados para pesca e para fiscalização marítima em zonas próximas, principalmente na ZEE.



Figura 28 Baía de Ana Chaves, São Tomé. (Marinha de Guerra Portuguesa, 2018)

Apesar das prevenções asseguradas pelos quadros da cooperação internacional, o país tem enfrentado diferentes ataques marítimos nos últimos anos, e esta tem sido a sua maior e principal ameaça em termos de segurança. O que justifica e amplia ainda mais a necessidade de o país dispor de navios operacionais para estes tipos de missões.

As dimensões das máquinas facilitam o processo de manutenção, o que simplificará ainda mais o método. Contudo deve-se ter em atenção os pequenos detalhes isto porque este tipo de controlo de condição, principalmente quando aplicados a motores alternativos e rotativos, apresentam um nível de dificuldade acentuada.



Figura 29, Navio Príncipe da Marinha de STP, (Gabinete

Não existem grandes fontes de trabalhos relacionados a navios com motores fora de bordo, muito menos referencias e Normas. Contudo pretende-se através de tentativas e erros, estimar valores aceitáveis de limites de vibração para esta gama de navios. No entanto o grande alicerce

deste trabalho será baseado na casa das máquinas do Navio Príncipe, um dos atuais navios que se encontram operacionais na Marinha de STP, que não tenham motor fora de bordo e que tenham casa de máquinas.

Inicialmente, será apenas considerado máquinas alternativas e rotativas que apresentem pouca dificuldade e com rotações iguais ou inferiores aos 1000 Hz.

Estima-se considerar equipamentos simples como por exemplo:

- Motores pequenos;
- Bombas;
- Veios;
- Chumaceiras;

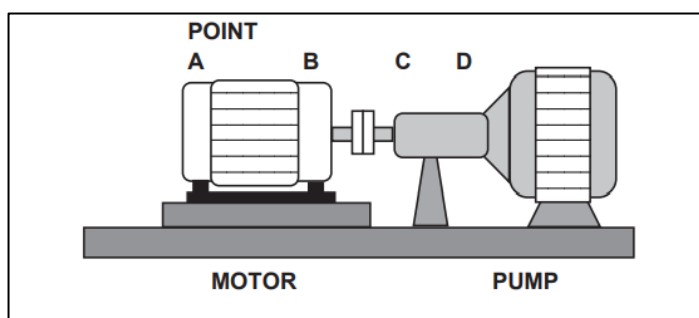


Figura 30, possíveis equipamentos a serem considerados. (© Monarch

Para simplificar o desenvolvimento do trabalho, não será associado neste método, o processo de diagnóstico. Este processo será encarregue por um profissional especializado, que será informado caso seja preciso. Sendo que a ideia seria de medir, recolher a leitura e comparar os valores com os valores padrão e verificar a existência de diferenças relativas aos valores estipulados nas Normas.

5.1.2. Objetivos Principais do Método

- Maximizar a fiabilidade das máquinas da Marinha de São Tomé e Príncipe;
- Melhorar a manutenção da Marinha de São Tomé e Príncipe;
- Dar início a uso de Controlo de Condição na Marinha de São Tomé e Príncipe;
- Utilizar a análise de vibrações como a técnica principal a ser implementada.
- Sofisticar o método de monitorização das máquinas da Marinha de São Tomé e Príncipe.

5.1.3. Estrutura e Organização do Método

Procedimentos

- Validação através de Funções Matemáticas;
- Validação através de testes em Software de Simulações mecânicas;
 - *Working Model*
- Validação através de Medições em Motores reais;
 - Criação de uma aplicação VI no *LabView*
 - Testes no motor da sala 23 da Escola Naval
 - Testes em casas de máquinas de navios portugueses
 - Chumaceiras
 - Bombas
 - Motores
 - Compressores

Ferramentas Necessárias

Inicialmente será desenvolvida simplesmente a fase de deteção, por isso as ferramentas e os equipamentos necessários serão os de maior facilidade.

Pretende-se obter:

- 1 computador;
- 1 acelerómetro 3D;
- Ferramentas de teste;
 - Acesso ao motor da sala 23 da Escola Naval portuguesa.
 - Acesso a casa das máquinas dos navios portugueses

5.1.4. Validação através de Funções Matemáticas

A representação menos difícil de anomalia, baseia-se na diferença entre duas leituras. Atualmente existem vários métodos para provar esta diferença entre as leituras. Cada material ou equipamento possui uma leitura padrão trazida da fábrica e para se aperceber da existência de anomalias, basta recolher uma leitura e verificar a diferença entre a leitura feita e a leitura padrão. Também se pode recolher os dados da leitura do funcionamento correto do equipamento e compará-los com os dados da leitura do funcionamento anormal do equipamento. Caso a diferença seja equivalente a zero, significa que não existe anomalias no equipamento.

Todos estes procedimentos apenas garantem que com a análise de vibrações, é possível detetar, analisar e até mesmo diagnosticar avarias em máquinas e em estruturas.

Existem atualmente várias formas de verificar a diferença entre duas leituras, sendo que a maioria delas estão estipuladas em NORMAS internacionais. E para a elaboração do programa deste trabalho, os padrões serão baseados nas NORMAS, ISO 10816, DNV e a ABS.

As regras serão igualmente aplicadas nas 3 etapas do projeto, no entanto as leituras serão diferentes. Sendo que para a validação através das funções matemáticas, a leitura será criada com base em condições iniciais aleatórias e irreais, definidas pelo utilizador.

Numa fase inicial, seguir-se-á apenas a NORMA ISO 10816, por forma a simplificar o projeto, porém eventualmente será aplicada as restantes NORMAS.

Para a resposta no tempo de uma vibração forçada, tem-se que a posição pode ser estimada em $x(t)$:

$$x(t) = e^{-\zeta \omega_n t} * (X * \sin(\omega_d t + \alpha))$$

Fórmula 6 Resposta em deslocamento no domínio do tempo

$$x(t) = e^{-\zeta \omega_n t} * (A * \sin(\omega_d t) + B * \sin(\omega_d t))$$

Fórmula 7 Resposta em deslocamento no domínio do tempo

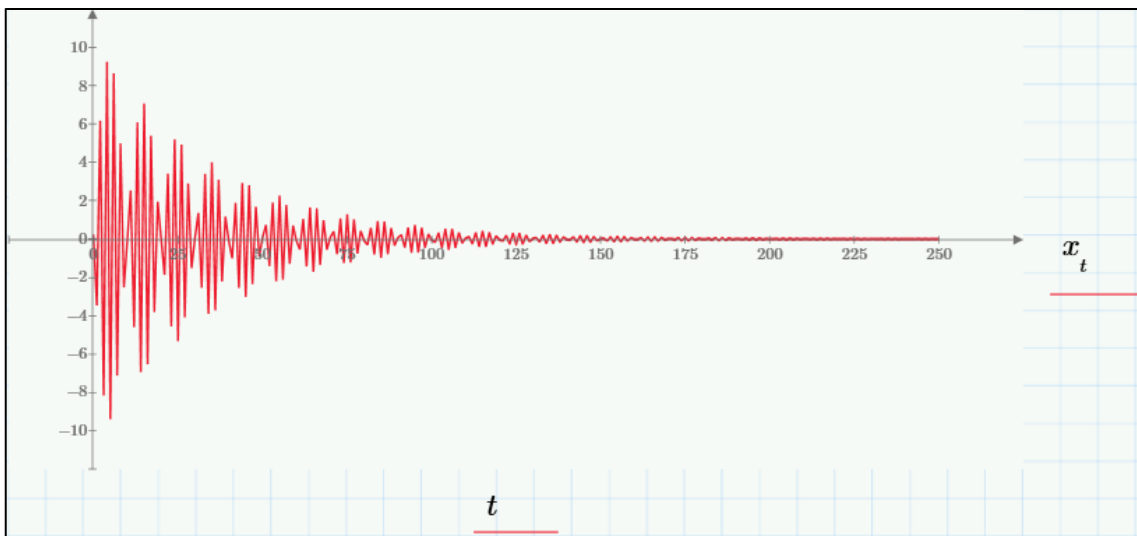


Figura 31 Resposta no tempo em posição, elaboração própria.

Esta fórmula é composta por variáveis representadas por números reais e variáveis representadas por números complexos. Sendo que a sua composição é dada da seguinte forma:

- t é o tempo de aquisição;
- X é a amplitude;
- α é a fase;
- ω_n é a frequência natural.

Pode-se estimar a velocidade em ordem ao tempo a partir da fórmula da posição, sendo que o procedimento seria baseado na variação da posição em ordem ao tempo, ou seja, a velocidade é a derivada da posição em um determinado período de tempo.

Derivando a posição

$$v(t) = \frac{d}{dt}(x(t))$$

Fórmula 8 Resposta em velocidade no domínio do tempo

obtém-se a seguinte fórmula:

$$v(t) = [e^{-\zeta \omega_n t} * (-A * \omega_d * \sin(\omega_d t) + B * \omega_d * \cos(\omega_d t))] + [-\zeta * e^{-\zeta \omega_n t} (A * \omega_n * \cos(\omega_d t) + B * \omega_n * \sin(\omega_d t))]$$

Fórmula 9 Resposta em velocidade no domínio do tempo

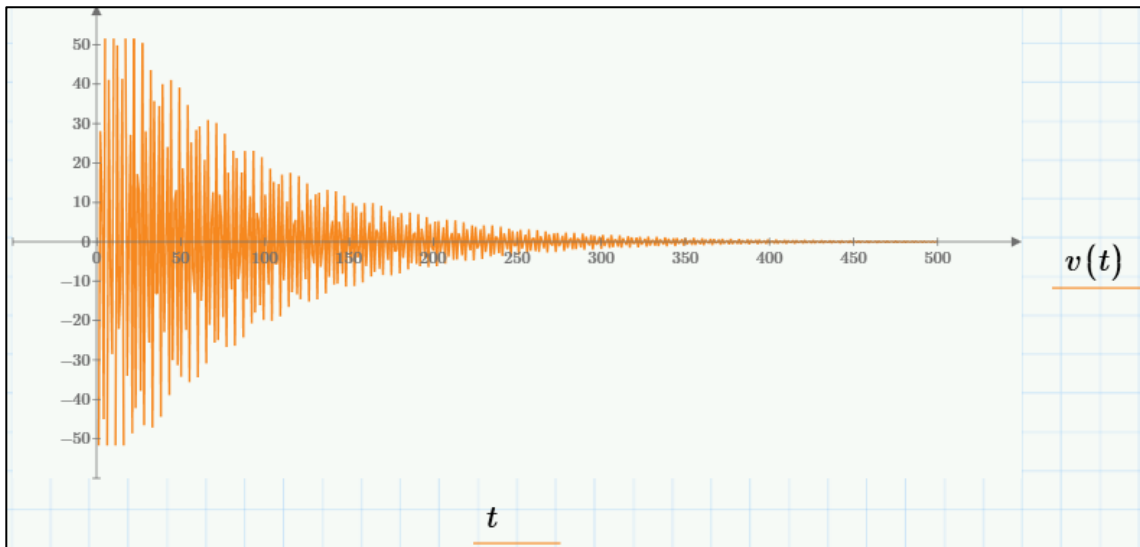


Figura 32 Resposta no tempo em velocidade, elaboração própria.

Esta fórmula, não muito diferente da anterior, é também composta por variáveis representadas por números reais e variáveis representadas por números complexos. Sendo que o A e a B foram estimados.

Para obter a aceleração, o procedimento seria o mesmo. Determinar a variação da velocidade, ou seja, a aceleração é a derivada da velocidade em determinado período de tempo.

Considerando que a leitura anterior de velocidade é uma leitura padrão de um dado equipamento, e que passado um determinado tempo *t* houve a necessidade de medir novamente e recolher uma nova leitura da mesma máquina, mas que desta, apresenta valores de amplitude significativamente superiores.

Para uma adequada representação de anomalias, pode-se fazer alterações nos dados da resposta em velocidade. Dados estes que podem ser amplitude, fase e

frequência.

Para uma nova resposta no tempo, tem-se que:

$$x1(t) = e^{-\zeta * \omega n * t} * (A1 * \sin(\omega d * t) + B1 * \sin(\omega d * t))$$

Fórmula 10 Resposta em deslocamento no domínio do tempo

A nova resposta no tempo em velocidade pode ser estimada através da derivada da nova resposta no tempo em posição, como procedido no exemplo anterior.

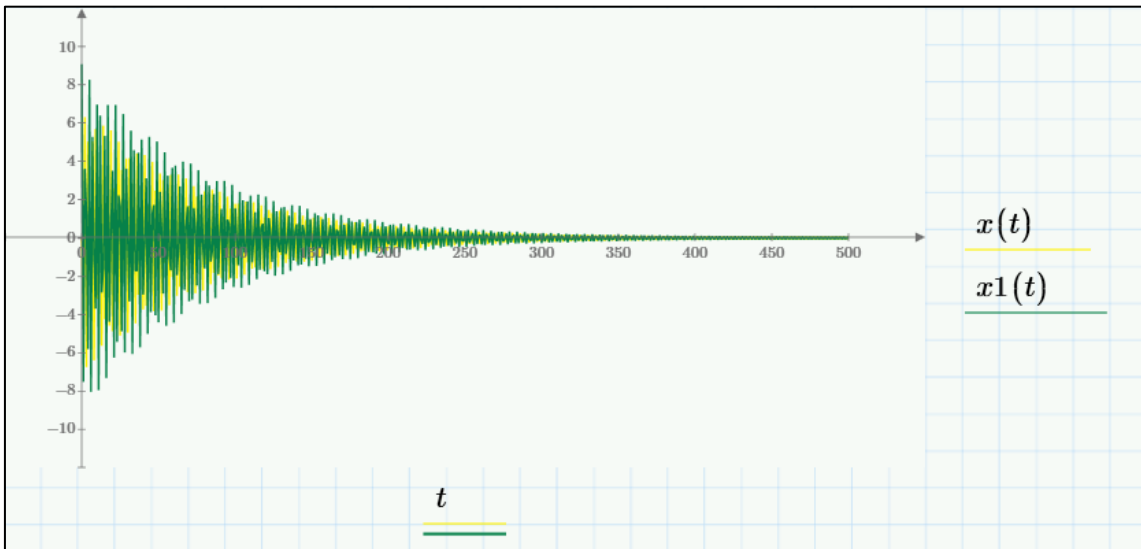


Figura 33 Comparação, resposta no tempo em posição. Elaboração própria.

Alterando os dados das constantes, nota-se que houve uma ligeira alteração na representação gráfica da resposta no tempo em posição. E para passar para a velocidade, pode-se derivar novamente a resposta no tempo em posição, como procedido anteriormente.

$$v1(t) = \frac{d}{dt}(x1(t))$$

Fórmula 11 Resposta em velocidade no domínio do tempo

A fórmula da nova resposta no tempo em velocidade é:

$$v1(t) = [e^{-\zeta * \omega n * t} * (-A1 * \omega d * \sin(\omega d * t) + B1 * \omega d * \cos(\omega d * t))] + [-\zeta * e^{-\zeta * \omega n * t} (A1 * \omega n * \cos(\omega d * t) + B1 * \omega n * \sin(\omega d * t))]$$

Fórmula 12 Resposta em velocidade no domínio do tempo

Calculando o RMS (*Root Mean Square*) das duas funções, obtém-se um valor

que pode ser comparado entre as duas funções, tanto da leitura padrão como da leitura atual.

$$VRMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(x)^2 dt}$$

Fórmula 13 Root Mean Square

Cálculo auxiliar da velocidade em RMS de funções contínuas e discretas

$$VRMS = \sqrt{Average}$$

Fórmula 14 Root Mean Square

$$Average = \frac{1}{T} \int_0^T v(x)^2 dt$$

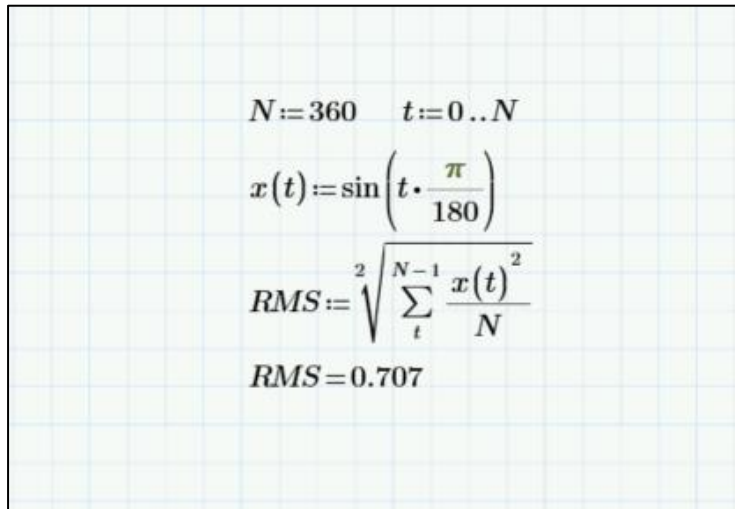
Fórmula 15 Average- sinal contínuo

$$Average = \sum_{x=0}^{T-1} \frac{v(x)^2}{T}$$

Fórmula 16 Average- sinal discreto

$$VRMS = \sqrt{\sum_{x=0}^{T-1} \frac{v(x)^2}{T}}$$

Fórmula 17 Root Mean Square



The image shows a handwritten script on a grid background. It defines N as 360 and t as 0 to N. It then defines x(t) as sin(t * pi / 180). Below this, it calculates RMS as the square root of the sum of x(t)^2 from t=0 to N-1, divided by N. The final result is RMS = 0.707.

$$N := 360 \quad t := 0 .. N$$

$$x(t) := \sin\left(t \cdot \frac{\pi}{180}\right)$$

$$RMS := \sqrt{\sum_t^{N-1} \frac{x(t)^2}{N}}$$

$$RMS = 0.707$$

Figura 34, Comprovação da fórmula do RMS utilizando a função seno, elaboração própria.

Relativamente a resposta no tempo em velocidade da primeira função, o valor obtido em RMS é um escalar e a unidade é dada em milímetro por segundo. Assim sendo este pode ser comparado com o outro valor da velocidade em RMS da segunda função da resposta no tempo.

Considerando %δ a diferença entre os RMS, pode-se estimar %δ como:

$$\% \delta = \left| \frac{RMS_i - RMS_f}{RMS_i} \right|$$

Fórmula 18 Percentagem da variação entre os RMS

5.1.5. Validação em Software de Simulações mecânicas

Working Model

O *Working Model* é um software de simulações mecânicas em 2D, que considera as leis de Newton em duas dimensões. E com este software consegue-se explorar muitas ferramentas e gerar sistemas como eixos, rotores, roldanas, engrenagens e muito mais.

No início, foi criado um programa que comprova a teoria da análise de vibrações. Para tal, foi construído um rotor simples e homogêneo, e a leitura da velocidade do centro de massa foi feita para uma velocidade de rotação de 1350 RPM; ver figura 35.

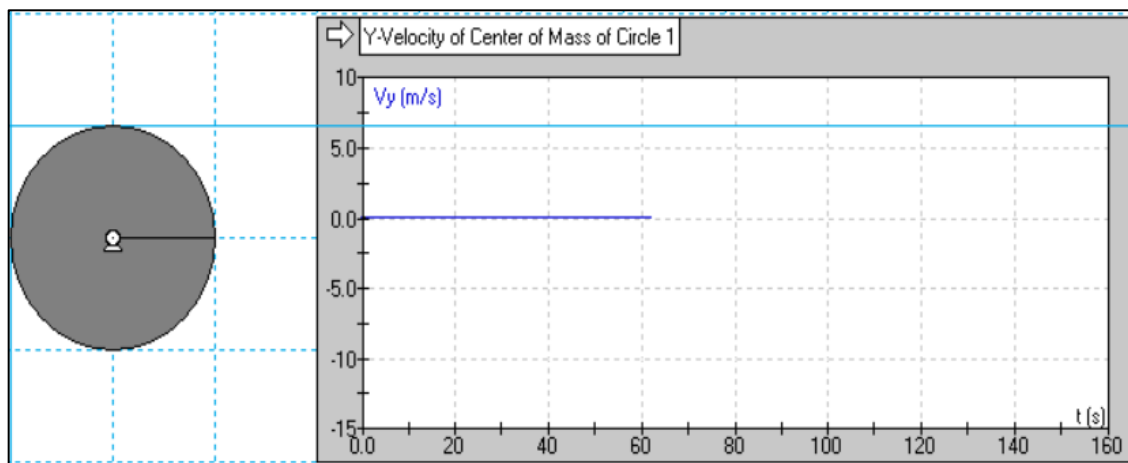


Figura 35 Rotor homogêneo em rotação. Elaboração própria.

O gráfico obtido da velocidade do centro de massa, relativamente ao eixo y é como se pode ver, aproximadamente uma linha reta, ou seja, a velocidade mantém-se aproximadamente constante, isto porque o rotor não possui nenhum

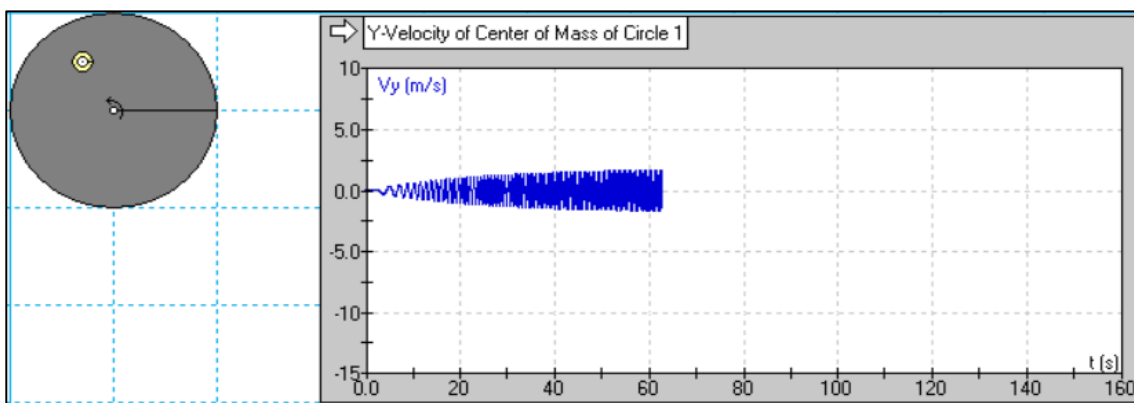


Figura 36 Rotor não homogêneo em rotação. Elaboração própria

desequilíbrio.

No entanto se houver alterações ao longo do tempo, como por exemplo perda ou ganho de massa, esta variação não será nula. Para justificar, foi criado um outro

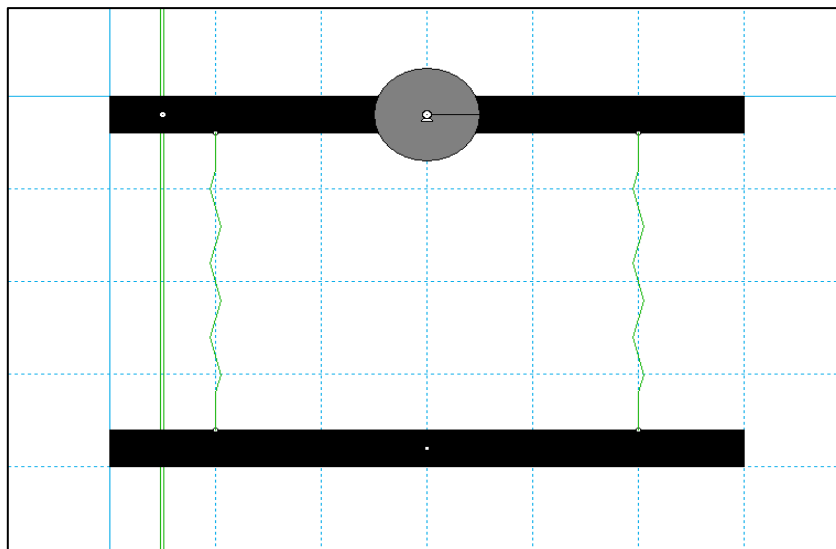


Figura 37 Sistema de massa e mola com rotor homogêneo criado no Working Model. Elaboração própria.

rotor, com características semelhantes ao primeiro. Mas desta, foi adicionado uma massa extra, fixa no rotor, e a uma distância do centro de massa do rotor.

Para experimentações menos teóricas, como as que foram apresentadas no capítulo das funções matemáticas, foi também desenhado neste software um sistema de massa e mola, representada pelas duas placas e as duas molas, como apresentado na figura seguinte.

Tendo como referência, uma máquina rotativa de aproximadamente **1350 RPM** e **5 cm** de raio do rotor, o sistema foi criado por forma a ser geometricamente aproximado ao motor da sala 23 da Escola Naval Portuguesa.

$N := 1350$	$f := \frac{N}{60 \cdot s} = 22.5 \frac{1}{s}$
$\omega := 2 \cdot \pi \cdot f = 141.372 \frac{1}{s}$	
$r := 5 \cdot \text{cm}$	$V := \omega \cdot r = 7.069 \frac{m}{s}$

Figura 38 Velocidade do rotor(m/s). Elaboração própria

Foi adicionado uma calha por forma a restringir o movimento da estrutura no eixo das abscissas, permitindo apenas o movimento. A máquina vibra

forçadamente devido a velocidade de rotação do rotor, que é de $2\pi f$, originando assim uma resposta harmónica de frequência f .

De referir que as placas por de baixo das máquinas são aproximadamente quadradas e possuem uma espessura de **5 mm**. Foi considerado a força da gravidade de aproximadamente $9.1 \frac{m}{s^2}$ com sentido para baixo no eixo vertical, por forma a condizer ao máximo com a realidade.

Relativamente a constante da mola **k** , o seu valor considerado foi de **550 $\frac{N}{m}$** para cada mola e o círculo cinzento representa o motor por cima da placa de cima do sistema.

Todos os detalhes foram aproximadamente estabelecidos por forma a que o programa apresentasse resultados coincidentes com a validação real.

Dados do motor		
Rotação da Máquina (RPM)	1350	Valor obtido no manual com os dados do motor
Massa do motor(kg)	6	Valor aproximado
Constante da mola(N/m)	1100/ 4 molas	Valor estimado por tentativa e erro.
Espessura da placa superior (mm)	5	Valor medido com fita métrica.
Raio do rotor do motor(cm)	5	Valor medido com fita métrica.
Observação: Alguns dados foram aproximados e alguns foram desconsiderados pela natureza da sua complexidade.		

Tabela 1 Dados do Motor. Elaboração própria.

De seguida, foi medido a velocidade do centro de massa da placa superior relativa ao eixo vertical, ou seja, o eixo y.

Após uma leitura de aproximadamente 40 segundos, obteve-se o seguinte gráfico. Da mesma forma que o rotor homogéneo (apresentado no primeiro exemplo), este gráfico faz algum sentido, porque o rotor do motor (também homogéneo), gira regularmente e com o centro de massa fixo. E visto que o centro de massa do rotor condiz com o centro de massa da placa superior, nenhuma força é transmitida do motor para a placa superior, exceto a gravidade.

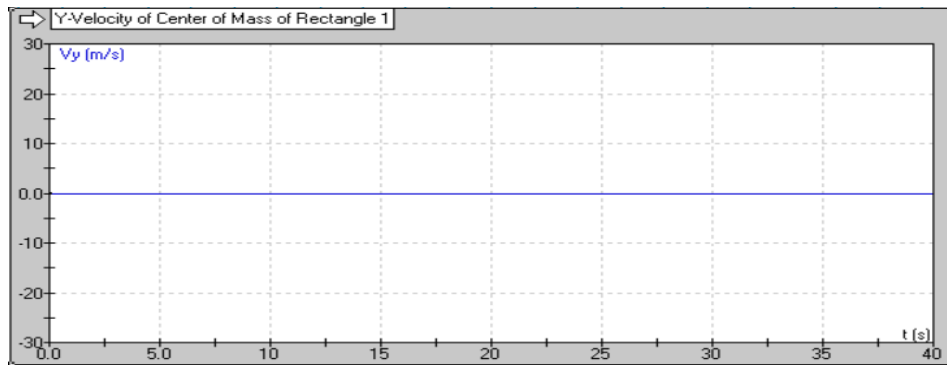


Figura 39 Medição de Velocidade no eixo y. Elaboração própria.

No entanto, se for adicionado uma massa ao rotor, massa esta que torne o rotor um sólido não homogêneo em torno do centro de massa, a resposta será significativamente diferente. E quanto maior for a massa adicionada e/ou distancia da massa ao centro de gravidade, maiores serão as variações de velocidade.

E por mais que o rotor não fosse inicialmente homogêneo, ainda assim haveria diferenças entre a leitura do sistema sem a massa extra e a leitura do sistema com massa extra adicionada, apesar de a velocidade do primeiro gráfico, a estas condições iniciais, não ser constante.

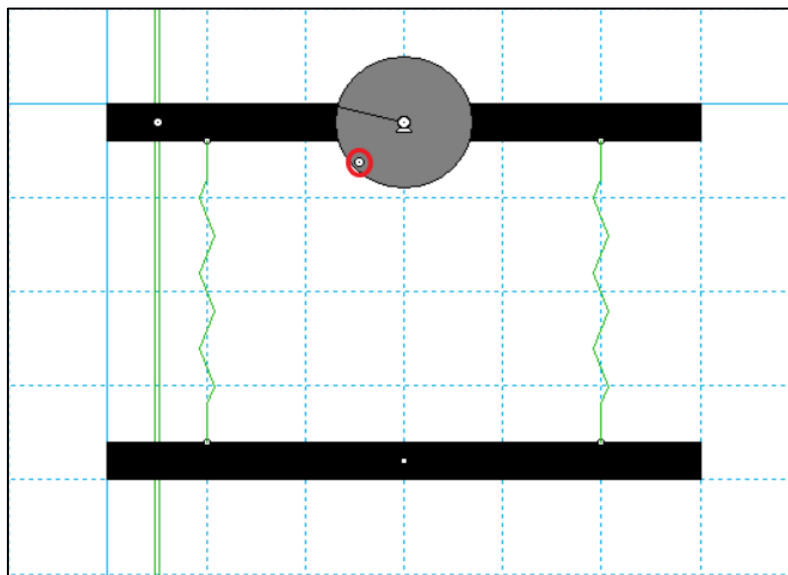


Figura 40 Sistema de massa e mola com rotor não homogêneo criado no Working Model. Elaboração própria.

A velocidade do centro de massa da placa superior varia ao longo do tempo em ordem ao eixo das ordenadas. Note-se que, foi colocado uma restrição de movimento da placa superior em direção ao eixo das abscissas, como se pode visualizar na figura anterior e/ou seguinte; ver as figuras 42 e 43.

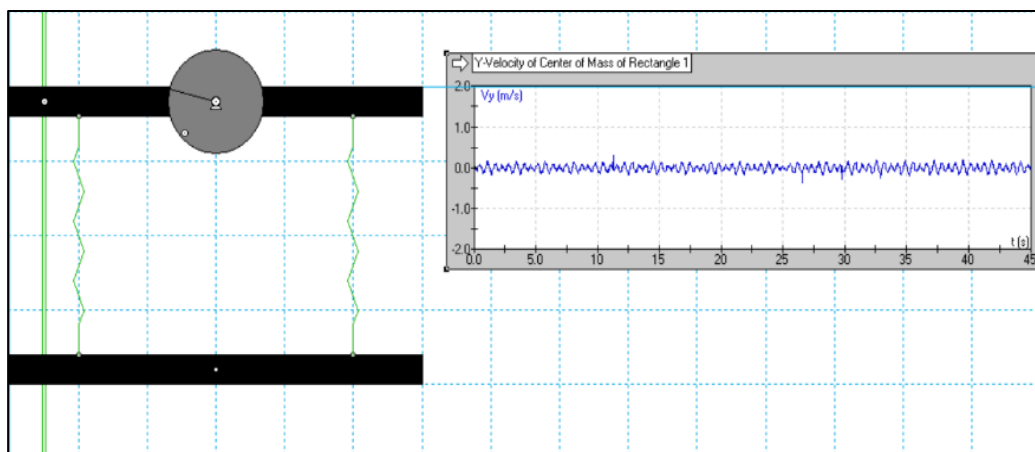


Figura 41 Simulador de um sistema massa mola, com motor assentado na placa superior. Elaboração própria

Com isso foi possível simular vários exemplos de desequilíbrio.

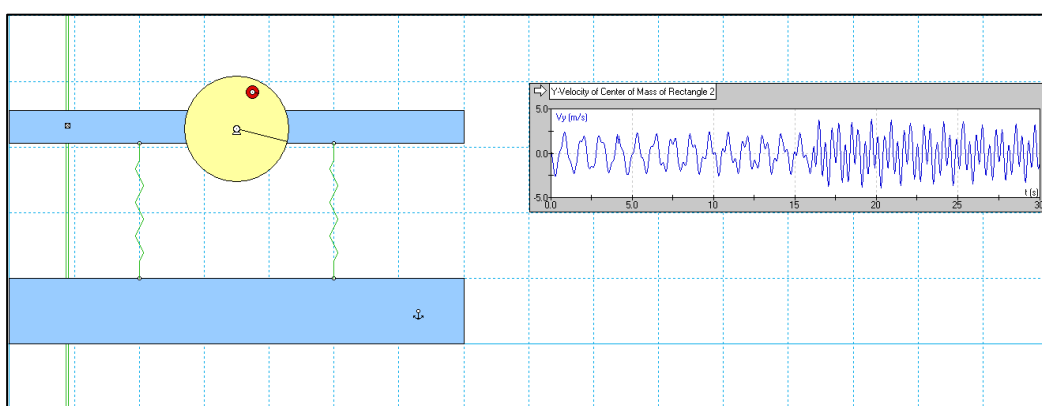


Figura 42 Medição de velocidade de um sistema de massa e mola com rotor não homogêneo criado no Working Model. Elaboração própria.

Após a criação de diferentes estruturas e visualização dos gráficos em *Working Model*, utilizou-se o software *MathCAD* para analisar os dados de maneira mais detalhada. Exportou-se os dados do sinal no tempo para um ficheiro '.txt', por forma a importá-los para o *MathCAD* para o cálculo da velocidade RMS e a análise dos dados no espectro de frequência. Sendo que primeiro foram exportados os dados do sistema de massa e mola e o motor com o roto homogêneo; ver figura 44.

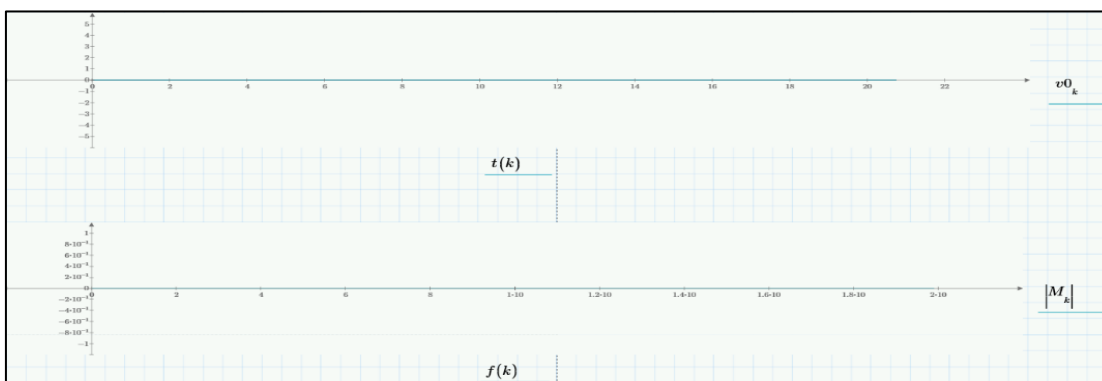


Figura 43 Análise dos dados recolhidos no WorkingModel, sistema homogêneo. Elaboração própria.

A representação gráfica dos dados recolhidos bem como o espectro de frequência foram igualmente nulas, pois com a variação de velocidade nula, a velocidade é a mesma. Ou seja, não há período e consequentemente não há frequência, como apresentado na figura anterior.

Por outro lado, o sistema não homogéneo apresentou diferenças nos valores de velocidade, o que possibilitou estimar o espectro de frequência e a velocidade em RMS; ver a figura 45.

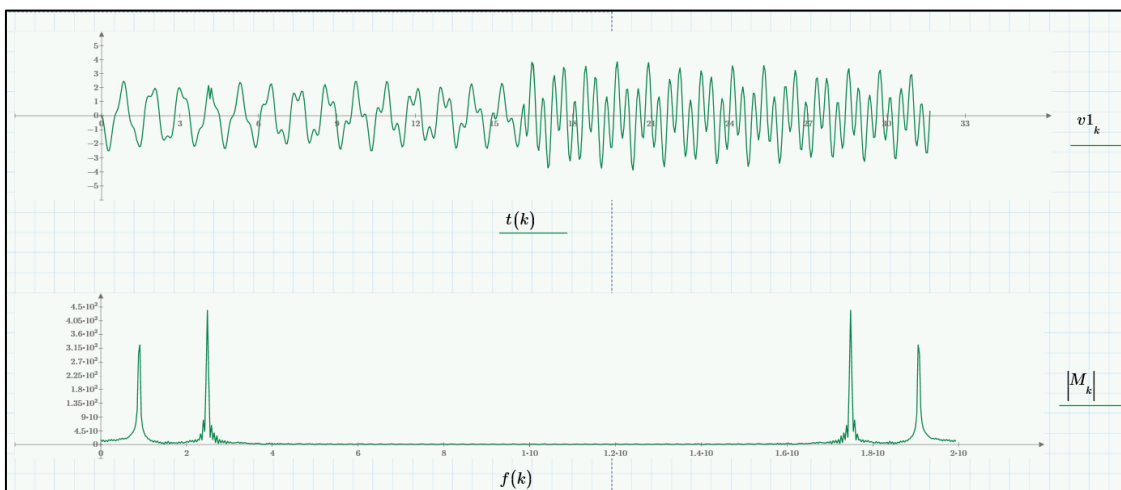


Figura 44 Análise dos dados recolhidos no WorkingModel, sistema não homogéneo. Elaboração própria.

5.1.6. Validação através de Medições em Motores Reais

5.1.7. Criação do aplicativo VI no LabView

Na fase das medições em motores reais, foi criado inicialmente criado uma aplicação executável no LabView para medições de vibrações. O LabView é um software de programação, porém diferente dos normais. Diferente do *Matlab*, C, C++, Java, *MathCad* e os outros softwares de programação em escrita, o LabView é um software de programação em blocos que executa os programas através de ícones.

De acordo com as condições da Marinha de São Tomé e Príncipe, pode-se criar um programa de controlo de condição que não afete significativamente o orçamento do mesmo. Para tal é necessário que este aplicativo de medição de vibrações seja o mais económico possível.

Numa fase inicial, o aplicativo seria executável num PC normal, que não tenha o software LabView instalado, isto porque o país pode não possuir pessoal

especializado para trabalhar com este software e, por mais que possuísse, esta não seria a ideia. Pretende-se que este aplicativo possa ser usado por qualquer tipo de operário, com ou sem experiência na área de vibrações.

Como mencionado anteriormente, as ferramentas necessárias para a execução deste aplicativo são os seguintes:

- 1x Computador com o sistema operativo Windows;
- 1x Acelerómetro da *Phidgets* ou similar.

5.1.8. Objetivo do aplicativo

Os objetivos iniciais deste aplicativo são:

- Testar a operacionalidade de máquinas da Marinha de São Tomé e Príncipe.
- Recolher dados Vibratórios de máquinas;
- Converter estes dados em valores comparáveis com as Normas (ISO 10816, DNV, ABS).
- Apresentar informações dos dados recolhidos em comparação com as Normas.

5.1.9. Metodologia de desenvolvimento do aplicativo

A criação do aplicativo foi dividida em 2 partes:

- Criação do painel frontal
- Criação do bloco de diagramas

O painel frontal é a parte do aplicativo que será utilizada pelos operários e tudo que o mesmo poderá ter acesso. E o bloco de diagramas é a parte do aplicativo responsável por armazenar informações relativa a codificação do programa.

Obviamente que as duas partes devem estar sempre relacionadas e em perfeita conexão, para que não haja erro ao executar o programa.

Painel Frontal

Para questões de segurança, foi criado um “ID User” e uma “Password”, por forma a restringir o acesso ao aplicativo. Com isso apenas terão acesso ao mesmo, pessoas com autorização para tal. É necessário que o aplicativo tenha uma certa restrição quanto ao seu acesso isto porque, visto que a principal finalidade do mesmo consiste em ser utilizado para o controlo de condição utilizando análise de vibrações em máquinas e equipamentos, é fundamental que apenas pessoal autorizado tenha acesso, pelo menos nessa fase embrionária; ver as figuras 46 e 47.

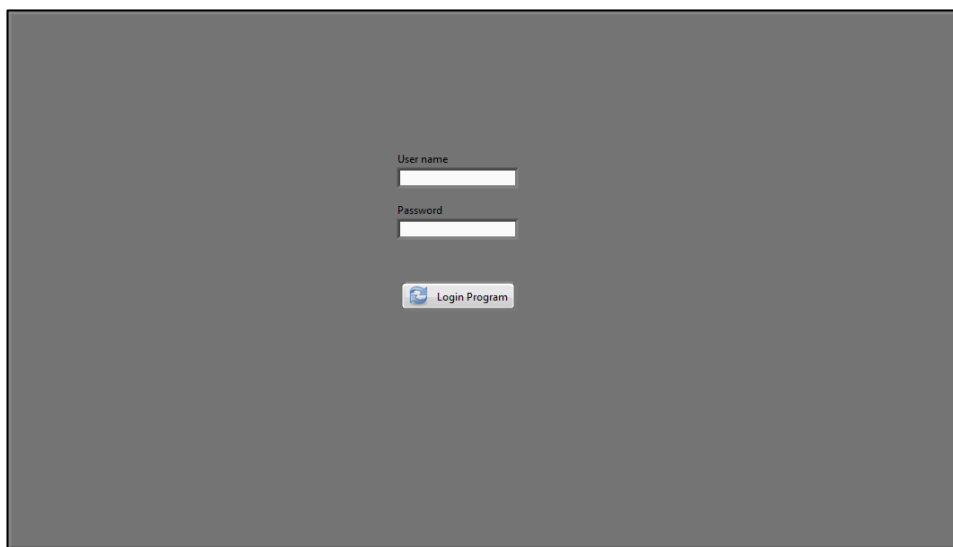


Figura 45 Painel Frontal, Credenciais de acesso. Elaboração própria

Relativamente ao painel frontal principal, este está diretamente conectada às credenciais. Sendo que apenas serão abertas caso as credenciais estejam corretas.

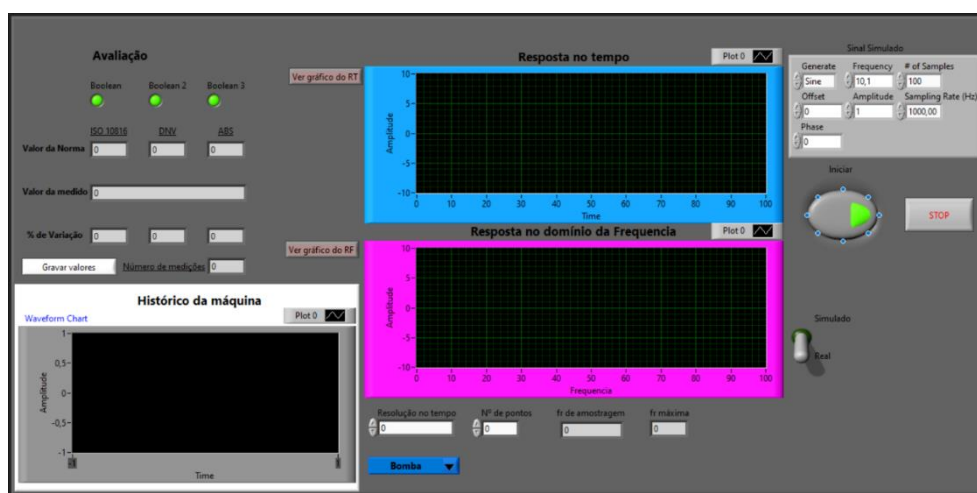


Figura 46 Painel frontal principal. Elaboração própria.

Neste mesmo painel frontal, é dada ao utilizador a possibilidade de seleccionar o tipo de máquina a testar, sendo que para cada tipo de máquina, os

limites das Normas são diferentes. Foram criadas condições para que houvesse também variáveis de entrada e variáveis de saída, sendo que as variáveis de entrada são variáveis pedidas ao utilizador antes do programa ser executado, enquanto, as variáveis de saída são as variáveis apresentadas ao utilizador após a execução do programa. Como por exemplo o tipo de máquina, é uma variável de entrada pois depende do critério do utilizador. Enquanto o valor medido, é uma variável de saída, pois é o que o utilizador adquire após correr o programa; ver a tabela 2 e a figura 48.

Variáveis de entrada	Variáveis de Saída
User Id e a Password	Valor medido
Tipos de máquinas	Gráfico das Respostas
Número de medições,	Booleano com o sinal de funcional ou não funcional
<i>Data interval</i>	

Tabela 2 Variáveis de entrada e de saída, LabView. Elaboração própria.

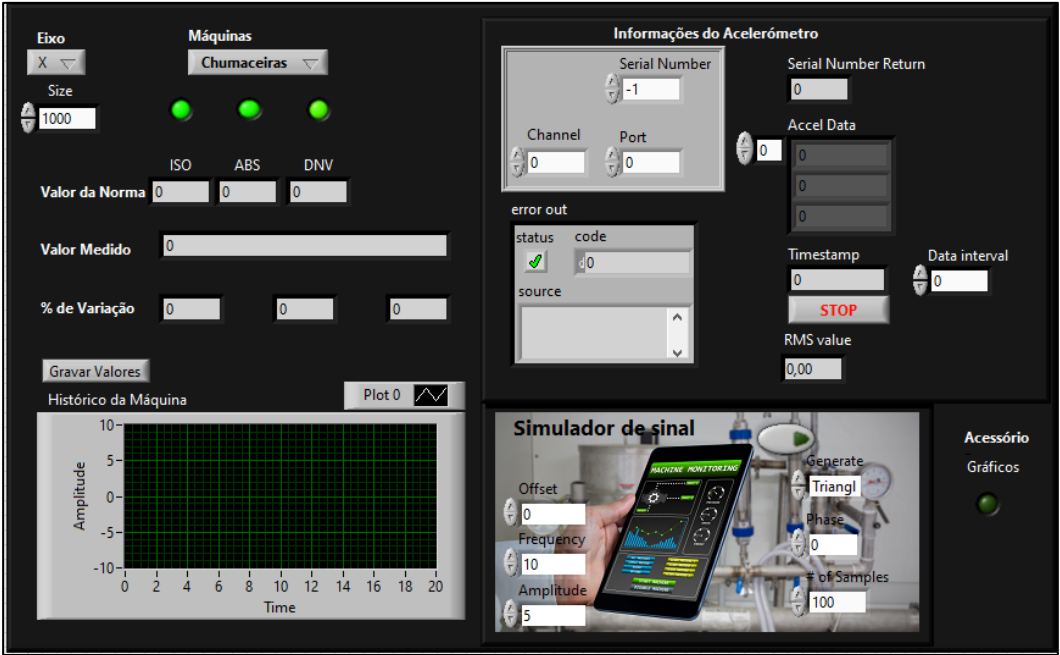


Figura 47 Painel frontal Principal, modelo final. Elaboração própria.

Os objetivos da primeira tentativa do programa foram satisfatórios, apesar de inicialmente, nem tudo ter corrido como esperado. Teve-se de fazer várias tentativas para que por fim se conseguisse o resultado pretendido.

O ícone ‘Eixo’ serve para o utilizador seleccionar o eixo a ser medido. Sendo que as possibilidades são de 3 dimensões: X, Y e Z.

O ícone 'Máquinas', tem uma função parecida, porém este ícone apenas possibilita ao utilizador, selecionar o tipo de máquina a ser medido. Sendo que foram inseridas ao programa 5 das máquinas principais de uma casa das máquinas. Nomeadamente: Motores >200 RPM com frequência abaixo de 200 Hz, veio, bomba e compressor.

Os valores das Normas serão automaticamente indicados após a seleção das máquinas, pois estes valores foram retirados das Normas mencionadas anteriormente.

A caixa com as informações do acelerómetro, destina-se fundamentalmente a apresentar ao utilizador, todos os dados relativos ao acelerómetro. No entanto o valor do RMS e do *data interval* apenas foram colocados por questões informativas.

O simulador de sinal serve para simular um sinal conhecido e validar que as funções do programa funcionam corretamente. Podem ser simulados sinais como: *Sine*, *triangle*, *Square*, *DC* e *Sawtooth*.

Relativamente ao ícone 'Gravar valores', este serve para gravar os valores de medições das máquinas por forma a compreender o seu comportamento ao longo do tempo. E o gráfico 'Histórico de Máquinas' serve para representar os valores gravados no ícone 'Gravar valores'.

A caixa acessória contém um ícone gráficos, que serve para mostrar ou não os gráficos. Sendo que os mesmos são respetivamente, o gráfico da resposta no domínio do tempo e o gráfico da resposta no domínio da frequência, como apresentado nos gráficos das figuras seguintes; ver figura 49 e 50.



Figura 48 Resposta no domínio do tempo. Elaboração própria



Figura 49 Resposta no domínio da frequência. Elaboração própria

Bloco de Diagramas

O Labview utiliza a ferramenta “Block Diagram” para realizar a programação e codificação das aplicações que são denominadas de VI (Instrumento virtual)

A criação deste aplicativo foi composta por várias funções e várias SubVI (Instrumentos virtuais utilizados como função e não aplicação). A linha de programação do aplicativo é a seguinte; ver figura 51.

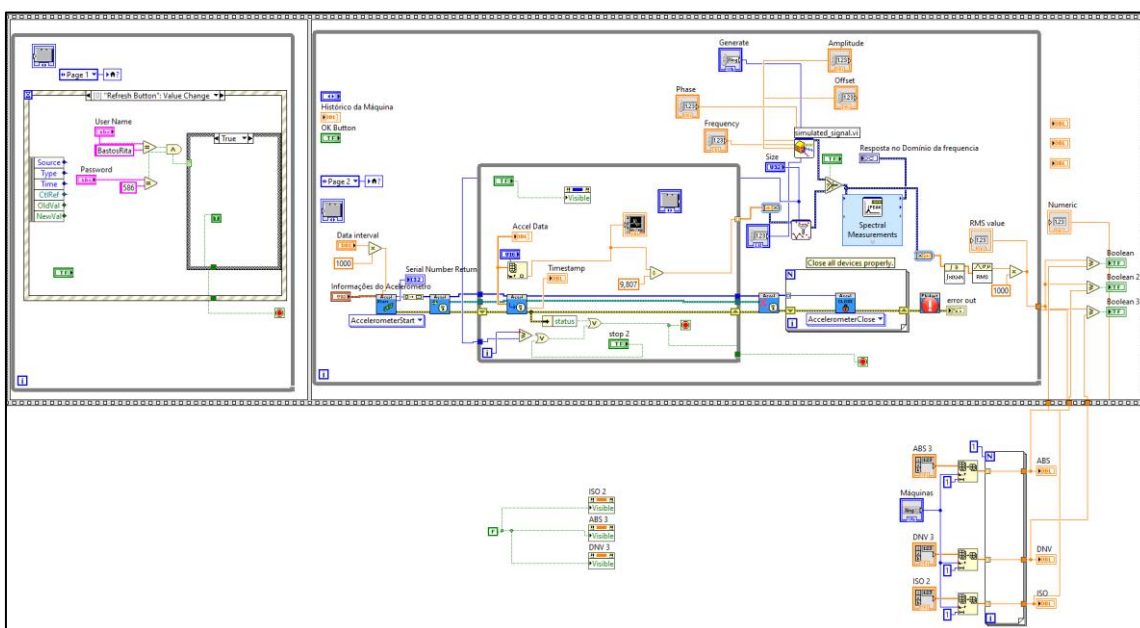


Figura 50 Bloco de diagrama. Elaboração Própria

Nesta linha inclui a compilação de todas funções e de todos os SubVI necessários.

A primeira codificação deste aplicativo consistiu na elaboração das credenciais de acesso.

Primeiramente, criou-se um “Flat Sequence”, por forma a realizar a transição entre a codificação das credencias e a codificação do programa. Depois criou-se uma

condição de igualdade, através dos *Structures*:

- *While Loop*
- *Case Structures*
- *Event Structures*

While Loop

O ciclo *While Loop* permite o programa rodar continuamente até que as credenciais inseridas pelo utilizador sejam exatamente iguais.

Case Structures

O case Structures possui 2 casos válidos e permite validar ou não as entradas. Sendo que para as credenciais iguais, é validado o “*true*” e para casos diferentes é validado o “*false*”.

Event Structures

O Event Structures depende de um reflex button, criado apenas para interligar os dados validos da condição à parte da paragem do ciclo While Loop. A paragem do ciclo While Loop permite transitar-se da frame atual do Flat Sequence para a frame seguinte. O True permite parar o ciclo While Loop depois de passar do Event Structures enquanto o False não permite nada, apenas apresenta um Pop-up com informações sobre os erros das credenciais; ver a figura 52.

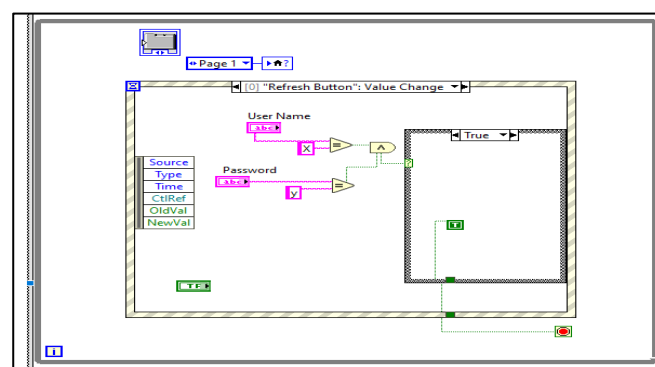


Figura 51 Codificação das credenciais. Elaboração própria.

A parte seguinte do *Flat Sequence* contém a codificação do programa. Esta parte está dividida em 4 partes principais. Nomeadamente:

- Aquisição e leitura dos dados do acelerómetro;

- Criação de um sinal simulado;
- Padronização dos dados dispostos (recolhidos ou simulados);
- Gravar ficheiros.

Aquisição e leitura dos dados do acelerómetro

Como apresentado na figura 53, esta parte está dividida em 3 secções principais, nomeadamente:

- Inicialização do acelerómetro;
- Extração dos dados;
- Fechar o acelerómetro.

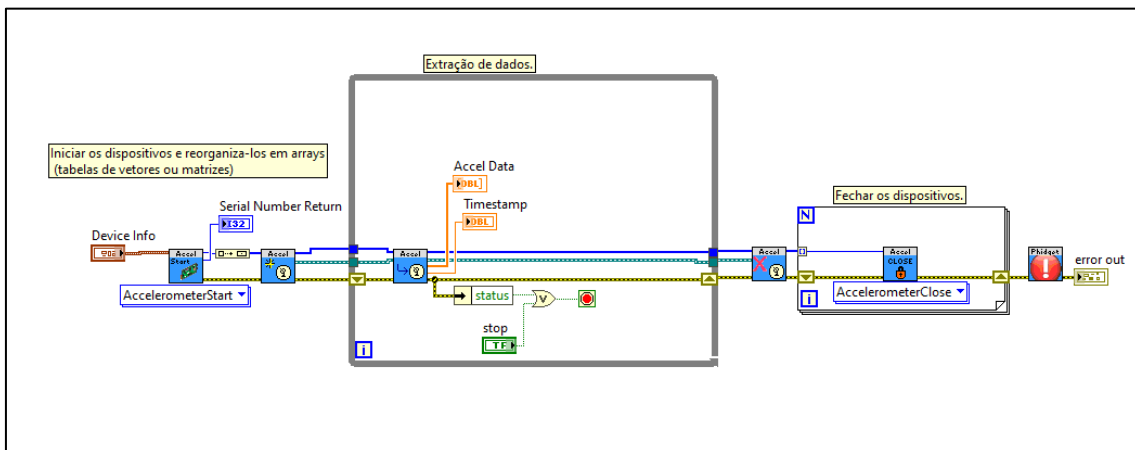


Figura 52 Aquisição e Leitura dos dados do Acelerómetro. Elaboração própria.

Criação de um Sinal simulado

Esta parte tem como objetivo, testar a correta funcionalidade da aquisição e leitura dos dados do acelerómetro, bem como, a correta funcionalidade da padronização dos dados. E para tal, pretendeu-se simular sinais de conhecimento geral e mais fáceis de serem simulados. Usou-se então o *Simulated Signal* (express VI), por forma a convertê-lo em um *standard SubVI*; ver a figura 54.

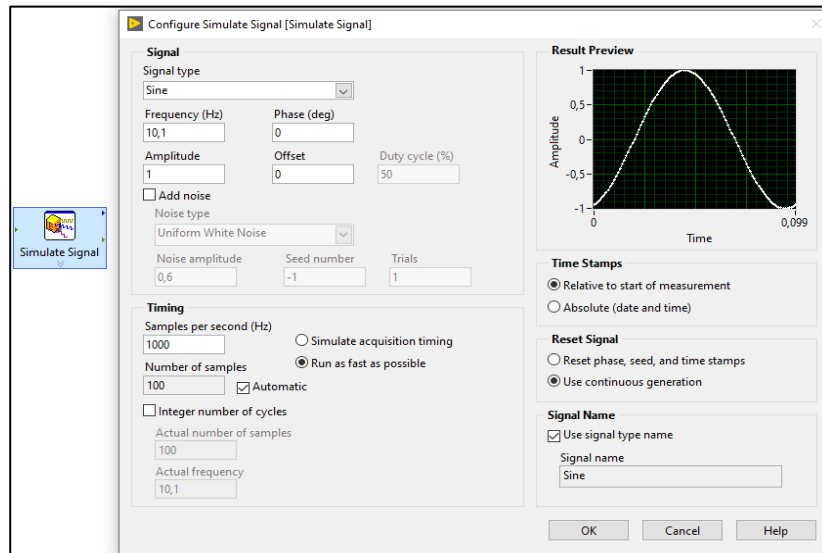


Figura 54 Simulador de sinal. Elaboração própria.

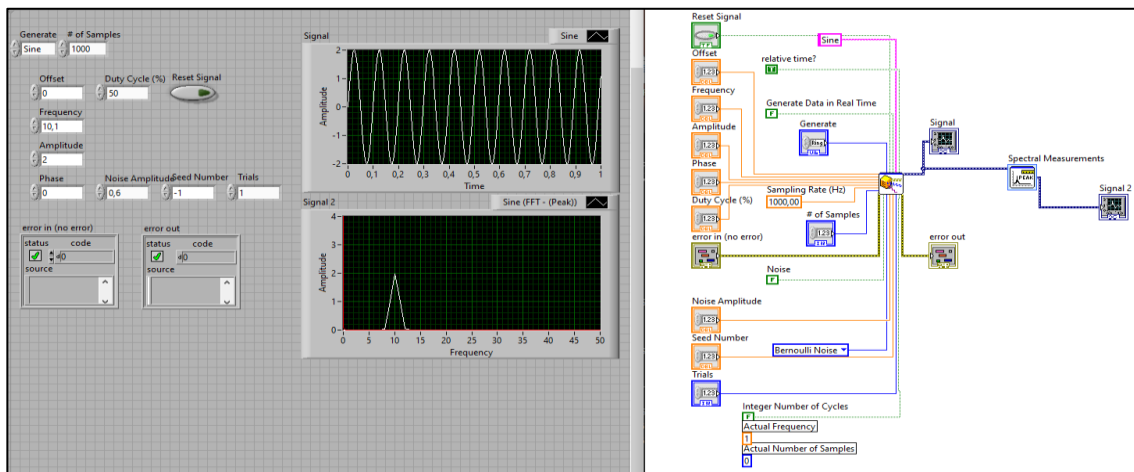


Figura 53 Simulador de Sinal. Elaboração própria.

Após converter o *Simulated Signal* em um SubVI, tornou-se possível alterar a codificação padrão do mesmo. Conseguiu-se alterar as variáveis, transformando algumas variáveis de constante para controlos, por forma a possibilitar a realização de alterações enquanto corre o programa do simulador, sem que seja obrigatório pará-lo; ver a figura 55.

Padronização dos dados

Relativamente a padronização dos dados, foi tido em conta as regras estipuladas em cada Norma. Sendo que para as 3 utilizadas, os valores devem ser apresentados em RMS, como mencionado na secção (5.1.4).

No entanto, para diferentes Normas e para diferentes Máquinas, a leitura deve ser filtrada em frequências diferentes. Por isso, grande parte desta fase, consistiu em organizar os cálculos dependendo da Norma e da máquina.

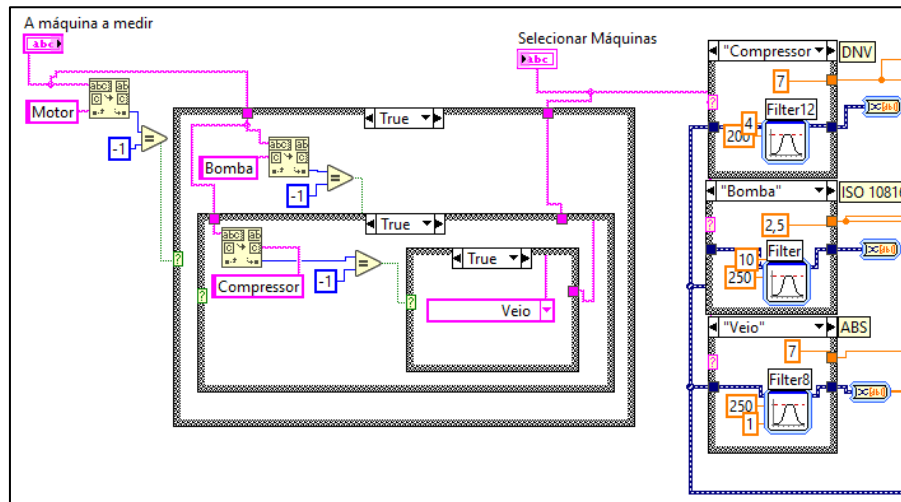


Figura 55 Criação da Combo Box com as máquinas e os limites de velocidade das Normas. Elaboração própria.

Primeiramente foi criado um *Combo Box* (caixa com vários menus), responsável por conter as máquinas disponíveis. Após isso foi feita a interligação destas máquinas com os limites de velocidade apresentados nas Normas. E para isto, utilizou-se uma combinação de *Case Structures*; ver a figura 55.

De referir que o acelerómetro usado recolhe dados em gravidade. Por isso foi necessário fazer a conversão de gravidade $9.807 \frac{m}{s^2}$ para velocidade $\frac{mm}{s}$; ver figura 50.

Os procedimentos foram os seguintes:

- Dividir o valor recolhido por $9.807 \frac{m}{s^2}$;
- Multiplicá-lo por 1000 e obter $\frac{mm}{s^2}$;
- Integra-lo uma vez em ordem ao tempo para obter $\frac{mm}{s}$.

Gravar Ficheiro

A análise de vibração a tempo real é importante, não obstante, seria de grande utilidade a disposição de ferramentas necessária para uma análise de vibração a um determinado espaço de tempo. Isso apresentaria comportamentos não detetados pela análise em tempo real. E para que se possa perceber o comportamento de uma máquina ao longo da sua vida útil, é necessário que se tenha disponível os dados do seu funcionamento. Foi por isso que se criou condições para que o aplicativo pudesse gravar os valores medidos. Esta ferramenta possibilitaria prever avarias, que seriam apenas detetadas quando aparecessem; ver a figura 56.

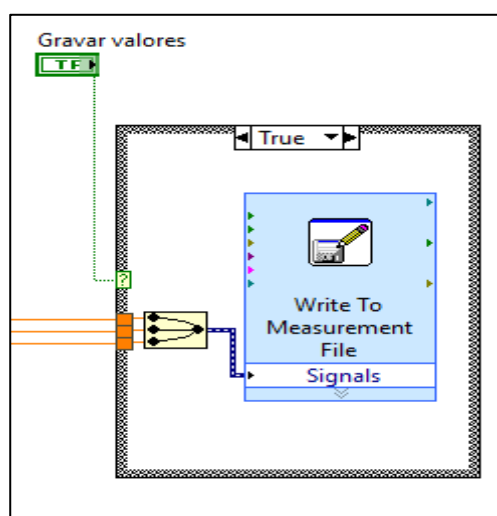


Figura 56 Gravar valores. Elaboração própria.

Esta linha de código serve para gravar os valores de velocidade em RMS da máquina selecionada, cada 1 dos 3 valores foi calculado de acordo com a Norma utilizada. Segue também os dados referentes ao nome da máquina selecionada, da data e hora de medição. Os navios da Marinha de São Tomé e Príncipe por serem relativamente pequenos, nem todas as suas máquinas condizem propriamente com as que foram selecionadas neste programa, porém algumas condizem.

Capítulo VI

Resultados

Neste Capítulo, serão apresentados os resultados obtidos da elaboração do programa. Na qual será posteriormente discutido e comentado.

6.1. Resultados validados experimentalmente por Funções Matemáticas

Para a fórmula da resposta no tempo em posição de um sistema forçado por uma máquina rotativa e baseando-se em valores aleatórios e não reais, tem-se que, os cálculos das constantes foram respetivamente:

- $A=0$;
- $B=0.138$;

$$x_1(t) = e^{-\zeta \cdot \omega n \cdot t} * (A * \sin(\omega d \cdot t) + B * \sin(\omega d \cdot t))$$

Fórmula 19 Resposta no tempo em posição

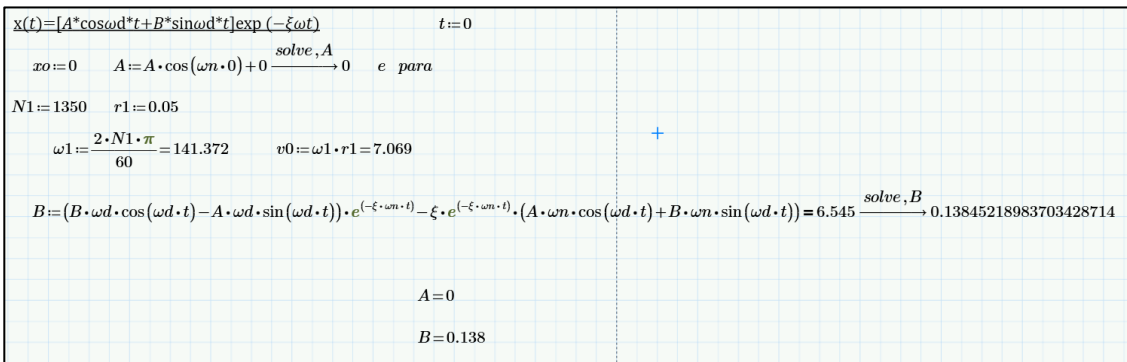


Figura 57 Estimativa das constantes associadas a resposta no tempo em posição de vibração forçada. Elaboração própria.

Isto considerando o valor do fator de amortecimento ξ de 0.01 e partindo do princípio de que a máquina rotativa, possui um raio do rotor de aproximadamente 5 cm e uma velocidade de rotação 1350 RPM.

Derivando a função da resposta no tempo em posição, por forma a obter a resposta no tempo em velocidade, obtém-se um valor de velocidade em RMS de aproximadamente 1.8 mm/s.

$$v(t) = \frac{d}{dt}(x(t))$$

Fórmula 20

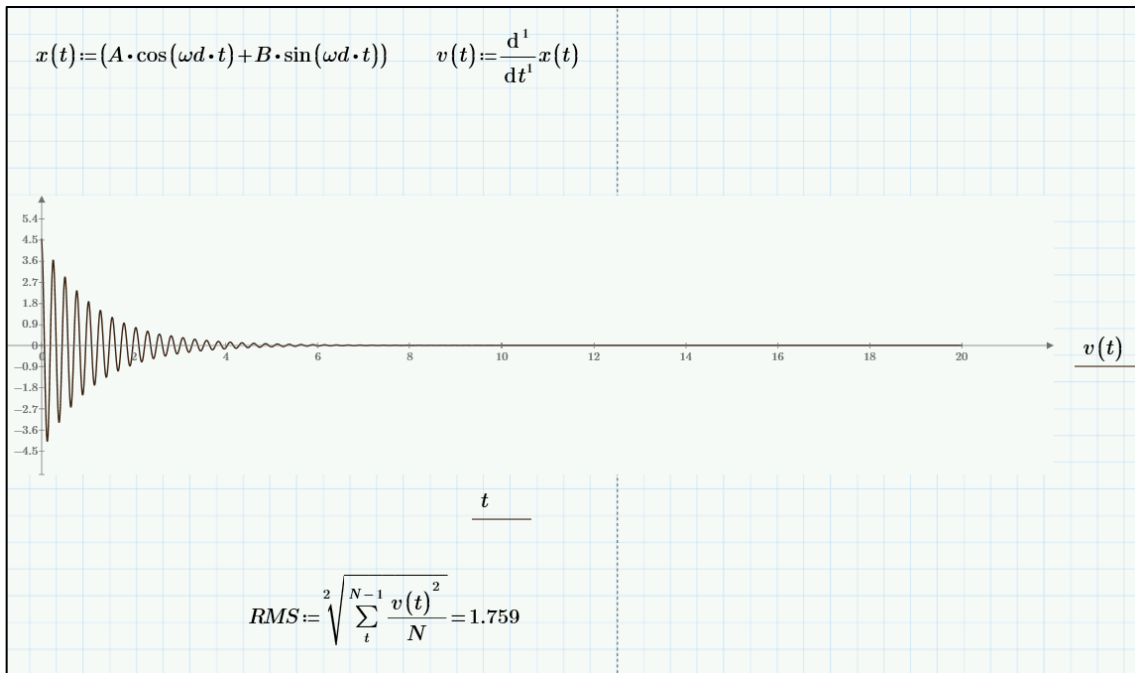


Figura 58 Valor do RMS através da função da resposta no tempo em velocidade. Elaboração própria.

O procedimento seguinte, seria comparar este valor aos valores limites apresentados em NORMAS ou em Sociedades Classificadoras.

Obviamente que isso implicaria a seleção do tipo de máquina, porque dependendo do tamanho, potencia e/ou frequência de rotação das máquinas, os limites de vibração requeridos são diferentes.

E caso seja feita alteração em qualquer parâmetro, como por exemplo o fator de amortecimento. A resposta será notavelmente diferente.

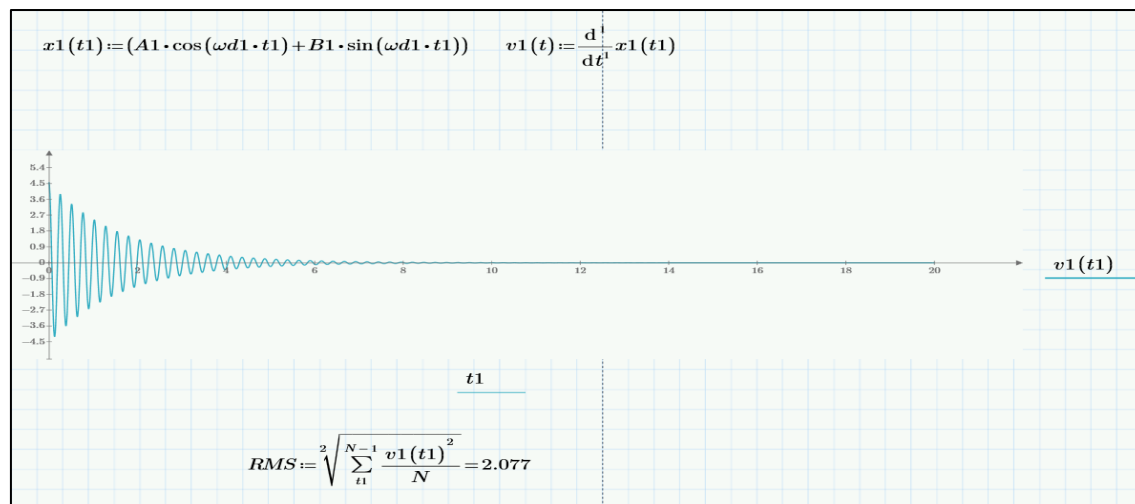


Figura 59 Valor do RMS através da função da resposta no tempo em velocidade com valores alterados. Elaboração própria.

E neste caso, pode-se simplesmente concluir que houve diferenças significativa nos valores de velocidade, o que podem ser indícios de anomalias.

Na realidade, é isto que acontece com maior frequência. Empresas industriais costumam comparar os valores das medições com os valores de medições válidos até o momento. Isto porque as vibrações das máquinas tendem a aumentar com o tempo. E por isso, em maior parte das vezes estas empresas usam leituras padrão como sendo leituras de equipamentos com anomalias, mas que cumprem as suas funções operacionais.

Resultados das Funções Matemáticas	
A	0
B	0,138
RMS1	1,759 mm/s
RMS2	2,077 mm/s

Tabela 3 Resultados das Funções Matemáticas. Elaboração própria.

6.2. Resultados validados experimentalmente por simulações Mecânicas no *WorkingModel*

Para o sistema de massa e mola, com o motor assentado na placa de cima e o rotor homogêneo, os resultados foram evidentes, isto porque a resposta descreveu uma linha reta horizontal.

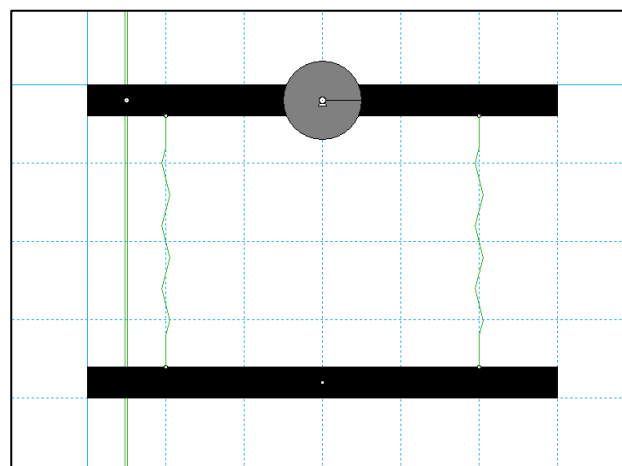


Figura 60 Sistema de massa e mola com rotor homogêneo criado no Working Model. Elaboração própria.

Como apresentado no capítulo anterior, os dados foram exportados para o *MathCad*.

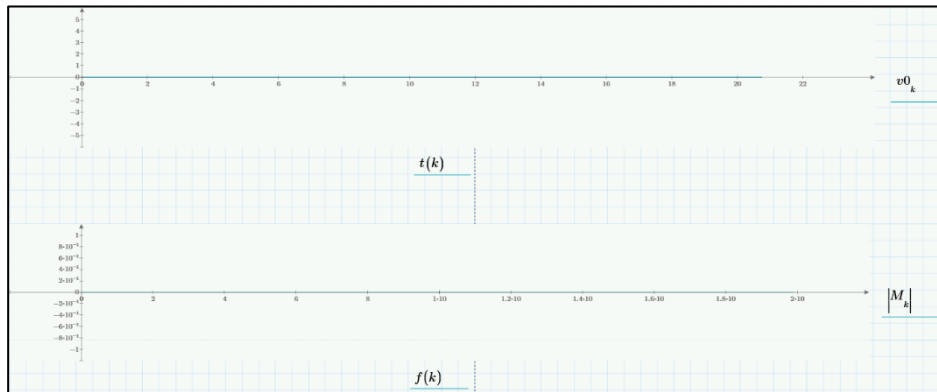


Figura 61 Análise dos dados recolhidos no *WorkingModel*, sistema homogéneo. Elaboração própria.

O valor da velocidade em RMS = **0 mm/s**, como esperado. Nota que os resultados fazem certo sentido.

A velocidade em RMS por depender de uma função quadrática, apenas é nulo para velocidades nulas.

t	Vy			
0	0			
0,05	0			
0,1	0			
0,15	0			
0,2	0			
0,25	0			
$t0 := excel^{*D2:D417*} \quad v0 := excel^{*E2:E417*}$				
$T := 0.05 \quad t_{total} := 20.85 \quad N := \frac{t_{total}}{T} = 417$				
$k := 0 \dots N - 1 \quad t(k) := T \cdot k \quad RMS := \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^{N-2} v0(k)^2}{N}} = 0$				

Figura 62 Resultado do RMS, Elaboração Própria.

Para o sistema de massa e mola, com o motor assentado na placa de cima e o rotor não homogéneo, os resultados não foram tão evidentes. Diferente do primeiro exemplo a resposta deste sistema apresenta variações de velocidades.

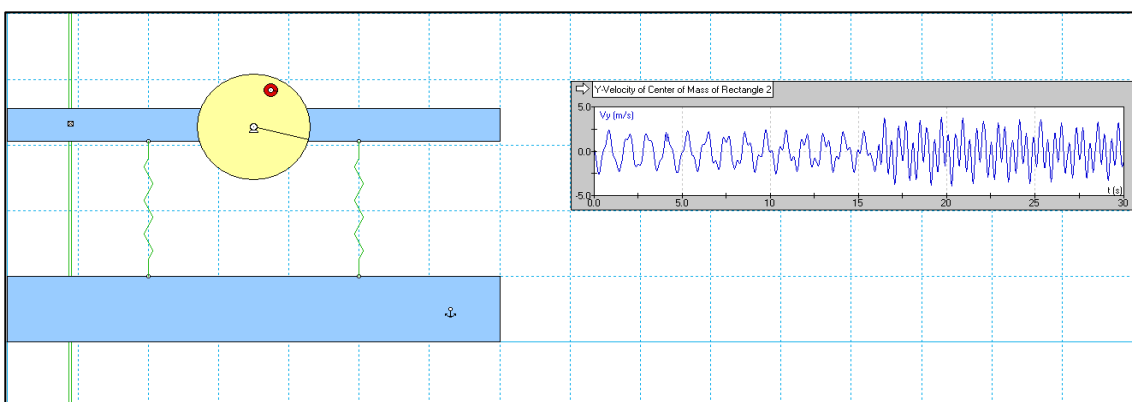


Figura 63 Simulador de um sistema massa mola, com motor assentado na placa superior. Elaboração própria

Foi preciso apenas 100 gramas para criar desequilíbrio e consequentemente, vibração no sistema. No entanto o sistema não foi desenhado como se pretendia inicialmente, contudo obteve-se resultados satisfatório e a representação gráfica da leitura e do seu espectro frequência foi o seguinte.

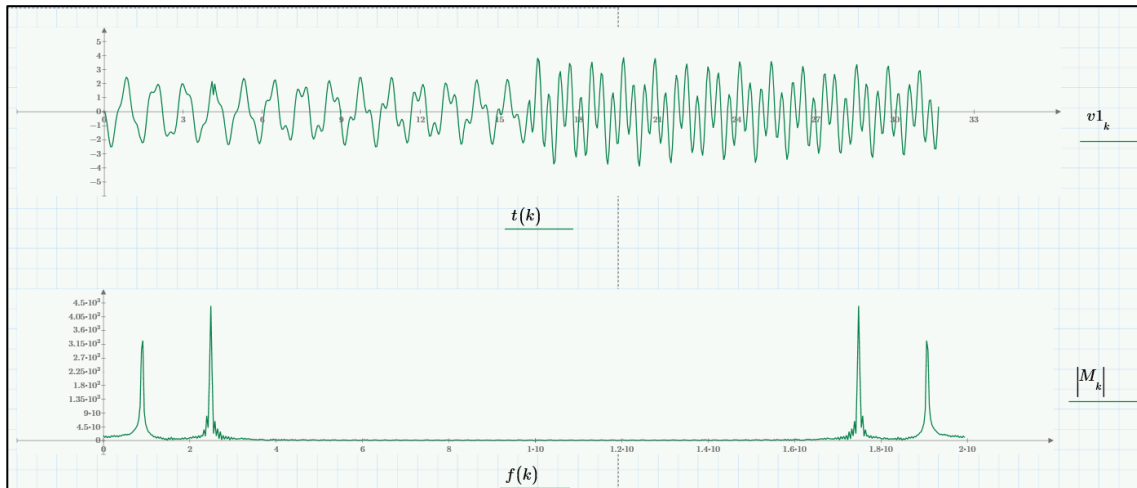


Figura 64 Análise dos dados recolhidos no WorkingModel, sistema não homogêneo. Elaboração própria.

O valor da velocidade em RMS = **1.651 mm/s** e a velocidade de pico = 3.858 (mm/s). Após isso, foi necessário construir um sistema que condissesse melhor com o motor da sala 23 da escola naval. Foi então criado um novo sistema de massa e mola, mas desta, com características muito mais parecidas com o motor.

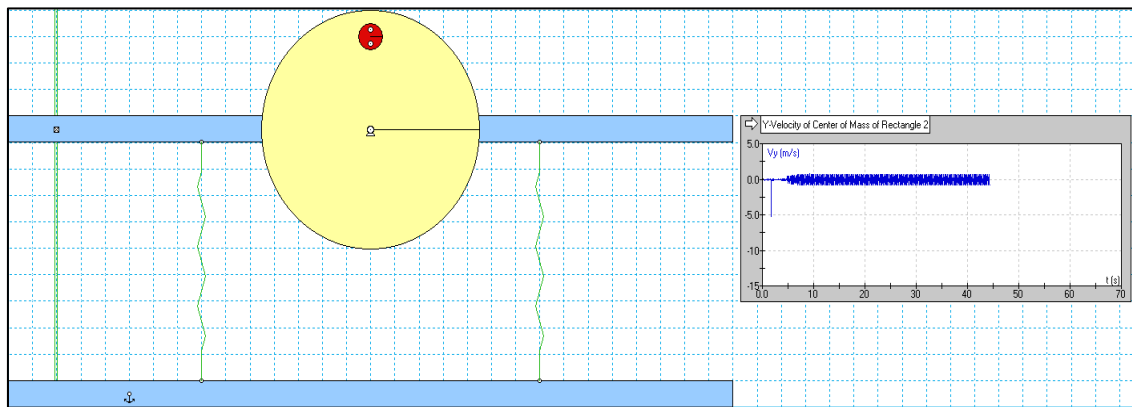


Figura 65 Simulador de um sistema massa mola, com motor assentado na placa superior. Dados mais aproximados. Elaboração própria

Tal como no exemplo anterior pode-se observar que o sinal no tempo possui uma fase transitória instável, porém pouco depois o motor vibra na sua frequência de rotação, demonstrando assim a harmónica causada pelo desequilíbrio aplicado.

A representação gráfica da leitura e do seu espectro frequência no MathCad foi a seguinte.

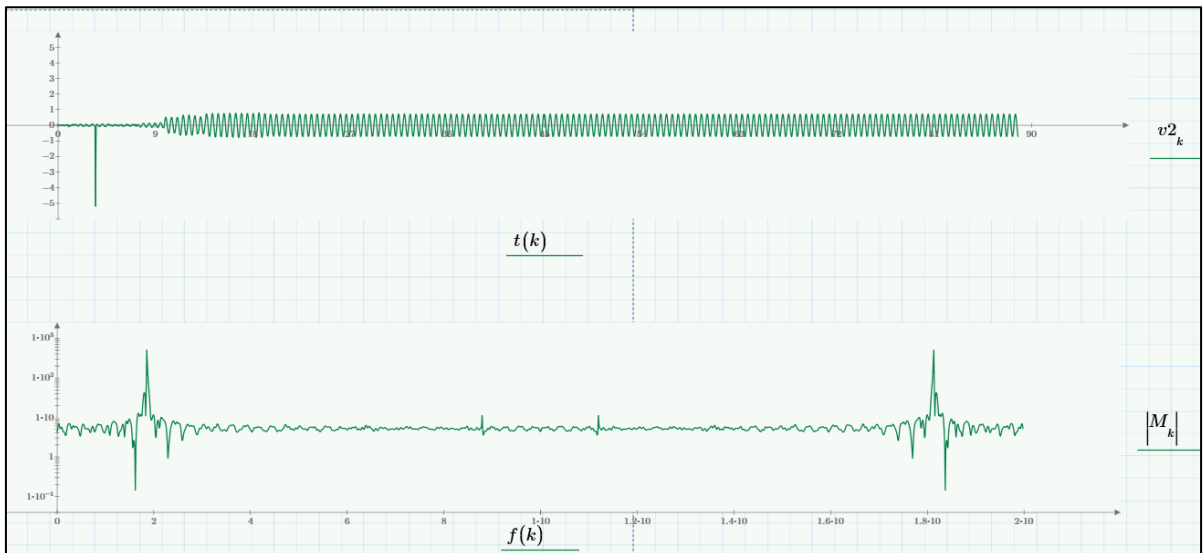


Figura 66 Valor da velocidade em RMS. Elaboração própria.

0

valor

$$\begin{aligned}
 T &:= 0.05 & t_{total} &:= 88.9 & N &:= \frac{t_{total}}{T} = 1.778 \cdot 10^3 \\
 k &:= 0 \dots N-1 \\
 t(k) &:= T \cdot k \\
 RMS &:= \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^{N-1} v_k^2}{N}} = 0.497 & pm1 &:= \max(v) = 3.858
 \end{aligned}$$

Figura 67 Análise dos dados recolhidos no WorkingModel, sistema não homogéneo. Versão atualizada. Elaboração própria

da velocidade em RMS = **0.497 mm/s** e a velocidade de pico=**0.814 mm/s**.

Resultados das Simulações Mecânicas		
Rotor homogéneo	V(RMS)	0 mm/s
	V(pico)	0 mm/s
Rotor não homogéneo	V(RMS)	3,087 mm/s
	V(pico)	6,346 mm/s
sistema inicial com o rotor homogéneo	V(RMS)	0 mm/s
	V(pico)	0 mm/s
sistema inicial com o rotor não homogéneo	V(RMS)	1,651 mm/s
	V(pico)	3,858 mm/s
Sistema final com Rotor homogéneo	V(RMS)	0 mm/s
	V(pico)	0 mm/s
Sistema final com Rotor não homogéneo	V(RMS)	0,497 mm/s
	V(pico)	0,814 mm/s

Tabela 4 Resultados das simulações Mecânicas. Elaboração Própria.

6.3. Resultados validados experimentalmente pelo aplicativo

Após a criação do aplicativo no *LabView*, fez-se a medição no motor da sala 23 da escola naval portuguesa; ver a figura 69.

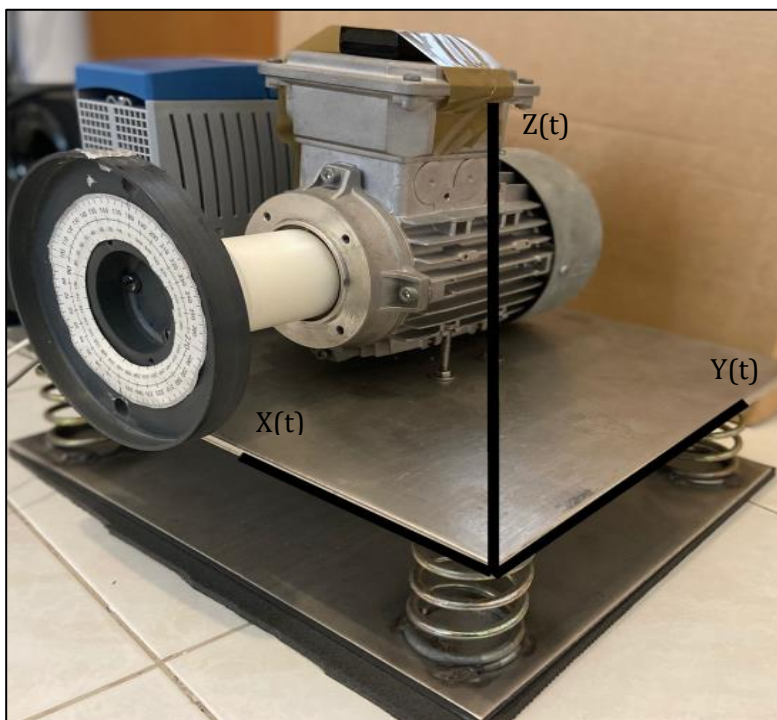


Figura 68 Motor elétrico da sala 23. Elaboração própria.

O sensor foi primeiramente montado para recolher dados na longitudinal, ou seja, no eixo X.

A máquina roda a 1250 RPM, o que significa que é esperado que uma das frequências seja $\frac{1250}{60s}$, ou seja, aproximadamente 21 Hz; ver as figuras 69 e 70 .

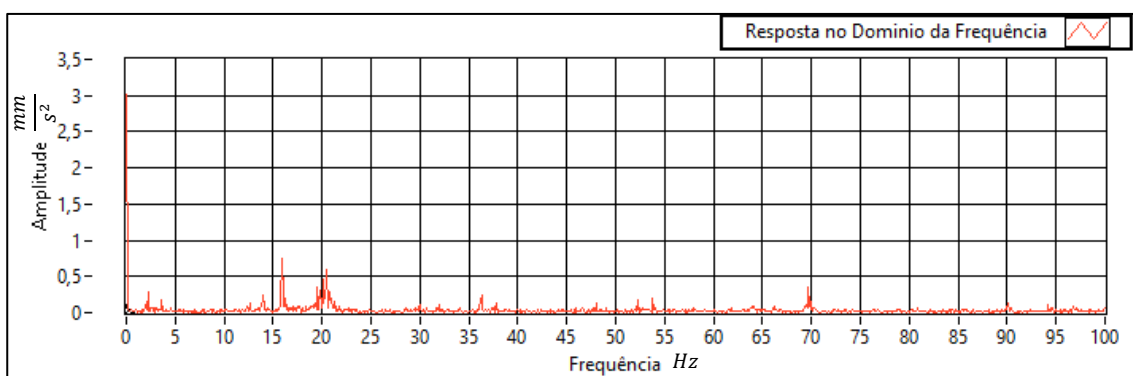


Figura 69 Resposta no domínio da frequência. Medição real no motor elétrico da sala 23. Elaboração própria.

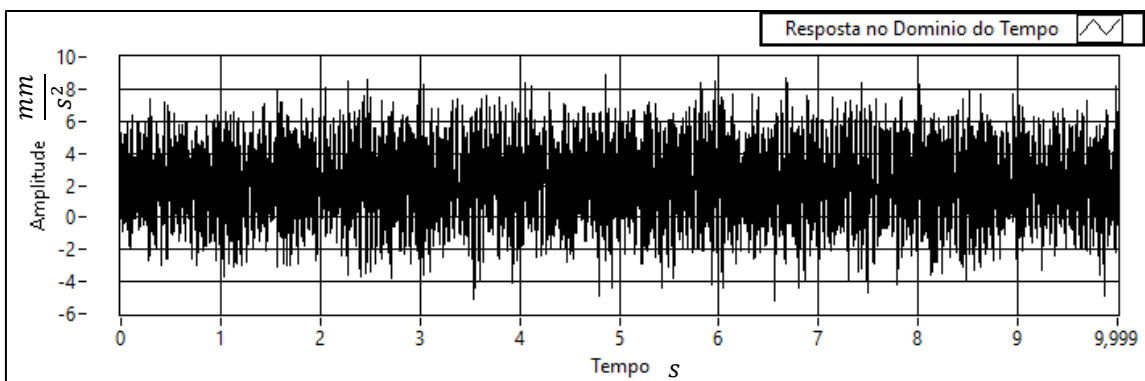


Figura 70 Resposta no domínio da frequência Elaboração própria.

Os dados foram coletados em milissegundos, por isso a recolha dos 10000 pontos demorou 10s.

Apenas pela representação gráfica do espectro de frequência, pode-se confirmar que existe uma frequência de aproximadamente 21 Hz; ver a figura 69.

Os valores de RMS de acordos com as 3 Normas, foram aceitáveis; ver a figura 71. Imagem completa em apêndice F.

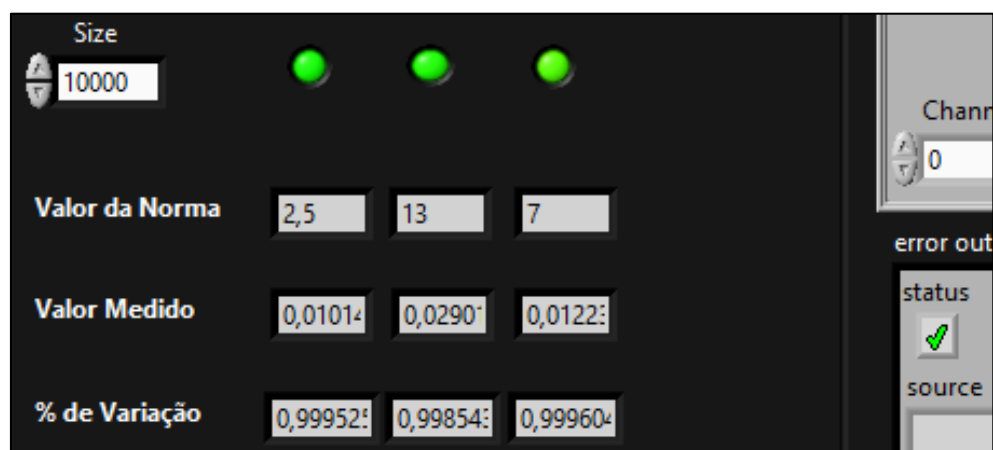


Figura 71 Valores do RMS. Elaboração própria.

As luzes verdes, significam que os valores calculados não excedem os limites estipulados, o que significa que motor elétrico, possivelmente esta a funcionar corretamente.

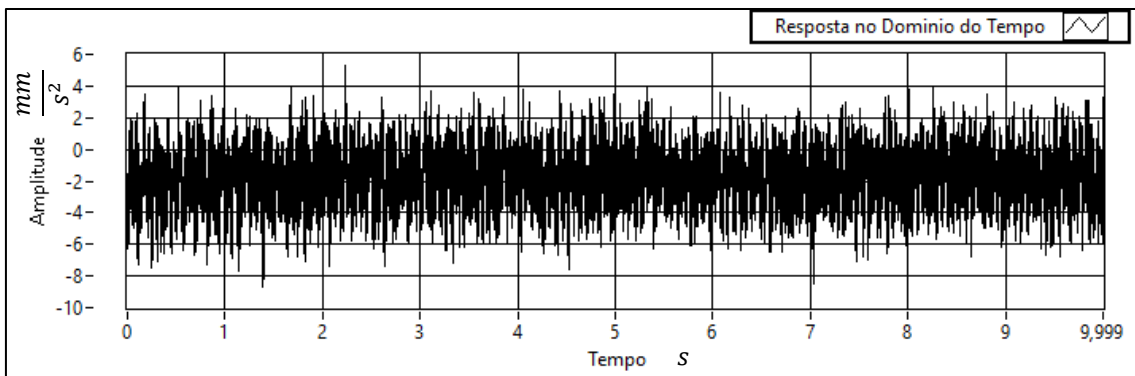


Figura 72 Resposta no domínio da frequência. Elaboração própria.

Contudo a que se ter em consideração que estes valores apenas defendem a operacionalidade do axial.

O procedimento seguinte foi de medir nos restantes eixos. Sendo que se mediu primeiramente o eixo axial e de seguida o vertical.

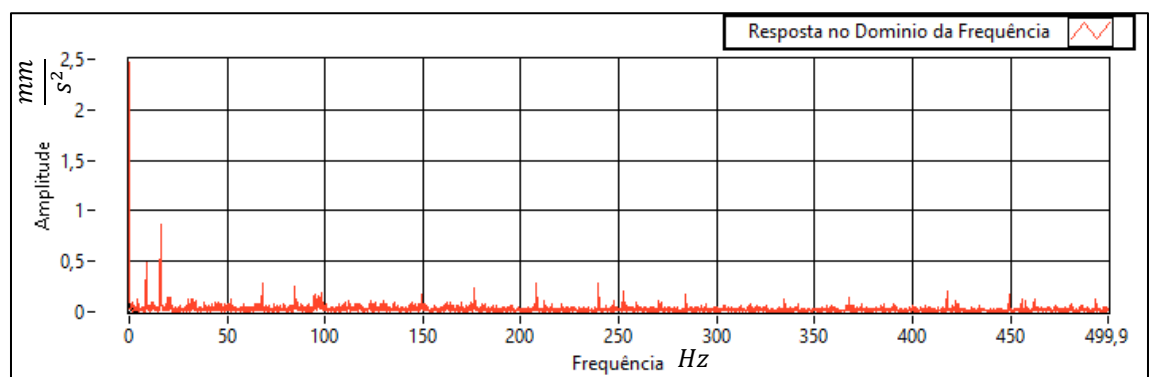


Figura 73 Resposta no domínio do tempo. Elaboração própria.

Como apresentado na figura 72 e 73 as respostas para o eixo longitudinal foram respetivamente:

Neste eixo a frequência da máquina revelou-se mais predominante em relação as outras.

Os resultados da medição no eixo axial, mantiveram-se aceitáveis; ver figura 74.

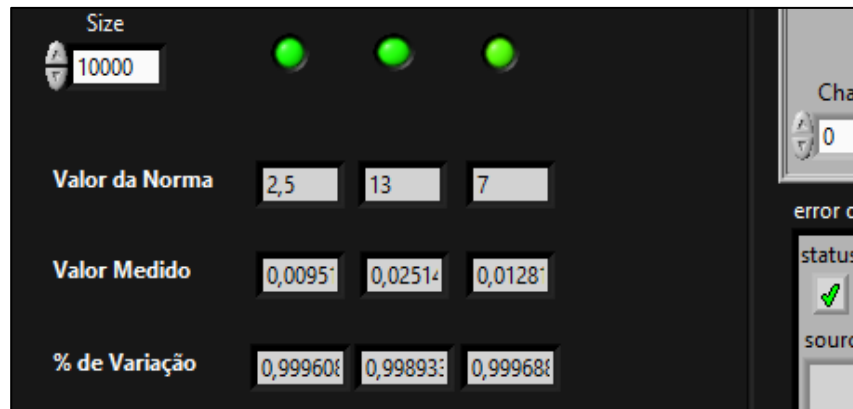


Figura 74 Resultados dos RMS

Os valores da % de variação por serem muito próximos de 1, apenas salientam que a diferença entre os valores da Norma e os valores medido são aproximadamente iguais aos valores da Norma, ou seja, os valores medidos são praticamente nulos.

De seguida, mediu-se no eixo vertical; ver figura 75 e 76.

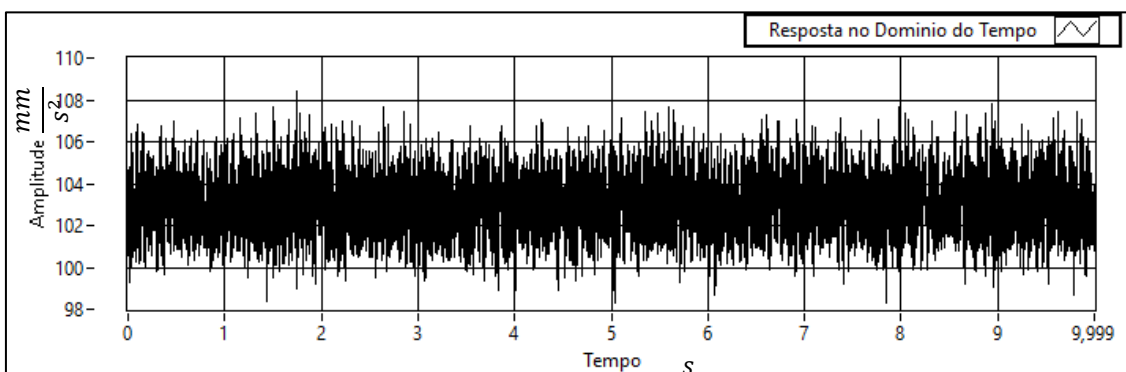


Figura 75 Resposta no domínio do tempo. Elaboração própria.

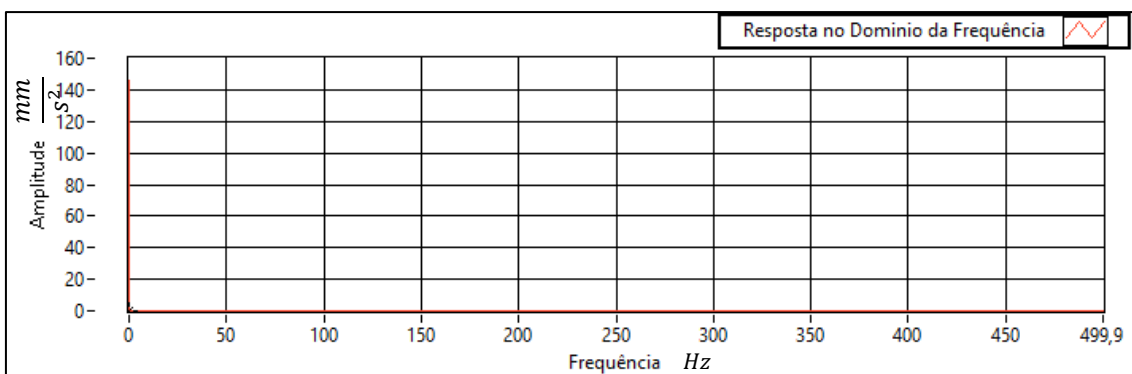


Figura 76 Resposta no domínio da frequência. Elaboração própria.

Repara que neste eixo o espectro de frequência apresenta valores e frequência aproximadamente nula. Isso acontece usualmente em máquinas horizontais. Pois estas vibram menos na vertical; ver a figura 77

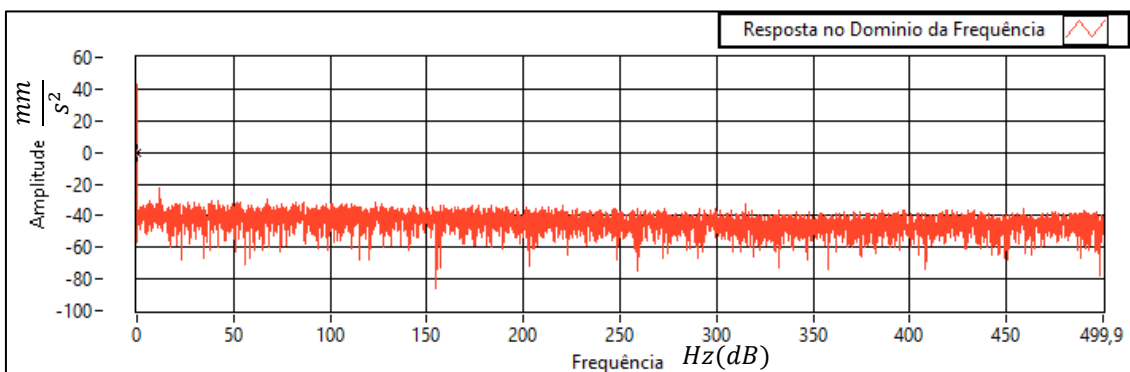


Figura 77 Resposta no domínio da frequência em decibéis. Elaboração própria.

Posto isso, simulou-se uma avaria no sistema. Foi adicionado uma pastilha de no rotor do motor para simular uma excentricidade; ver as figuras 78 e 79.

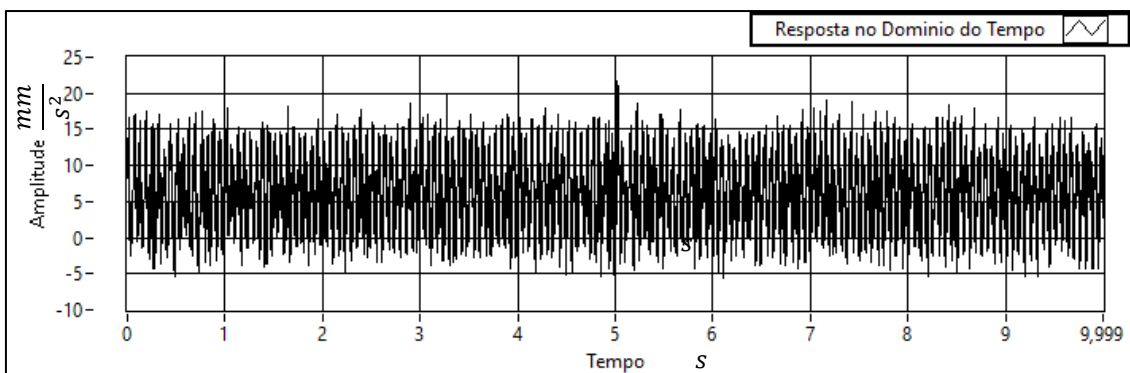


Figura 78 Resposta no domínio do tempo. Elaboração própria

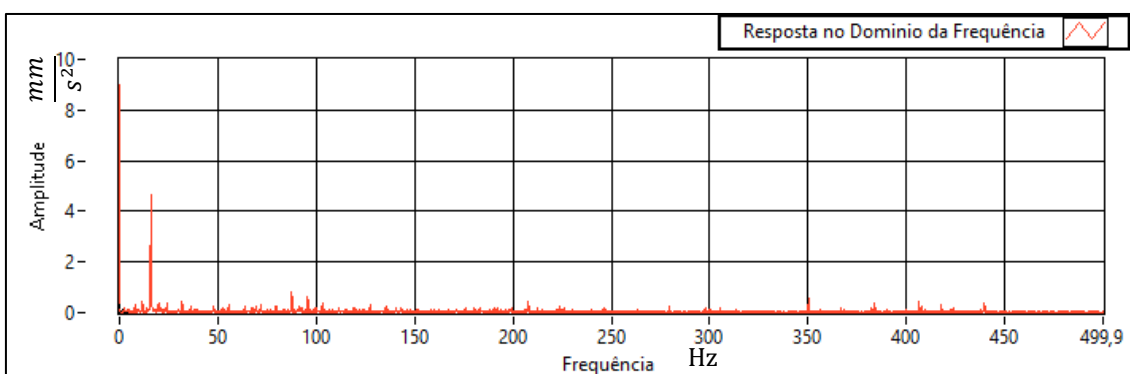


Figura 79 Resposta no domínio da frequência. Elaboração própria.

Ao adicionar a pastilha, criou-se um certo desequilíbrio entre o rotor e o veio do motor. Como simulado no *Working Model*, é esperado que os resultados sejam significativamente diferentes apesar da pastilha ser pequena; ver a figura 80.

Esta simulação foi feita no eixo axial. Comparando os valores adquiridos

entre estes dois exemplos, obtém-se o seguinte; ver as figuras 71 e 80.

Tabela 5 Tabela compilada com os resultados do Labview

Resultados Obtidos						
Normas / Eixos	ISO 10816		ABS		DNV	
	Sem anomalias	Com anomalias	Sem anomalias	Com anomalias	Sem anomalias	Com anomalias
Velocidade axial mm/s	0,01014	0,044	0,0295	0,1462	0,0122	0,0795
Velocidade longitudinal mm/s	0,0095	0,0121	0,02514	0,329	0,0128	0,0863
Velocidade vertical mm/s	0,0441	0,1012	0,8541	1,3321	0,14993	0,5341



Figura 75 Resultados do RMS. Sistema com anomalia. Elaboração própria.

Por forma a visualizar com mais detalhe a representação comparativa dos valores do RMS, criou-se um gráfico, onde se adicionou os valores apresentados na tabela 5. O gráfico contém 3 grupos, nomeadamente as 3 Normas. Sendo que os retângulos vazios representam o sistema sem anomalia, os retângulos cheios representam o sistema com anomalia e as cores servem para diferir os 3 eixos; ver a figura 79.

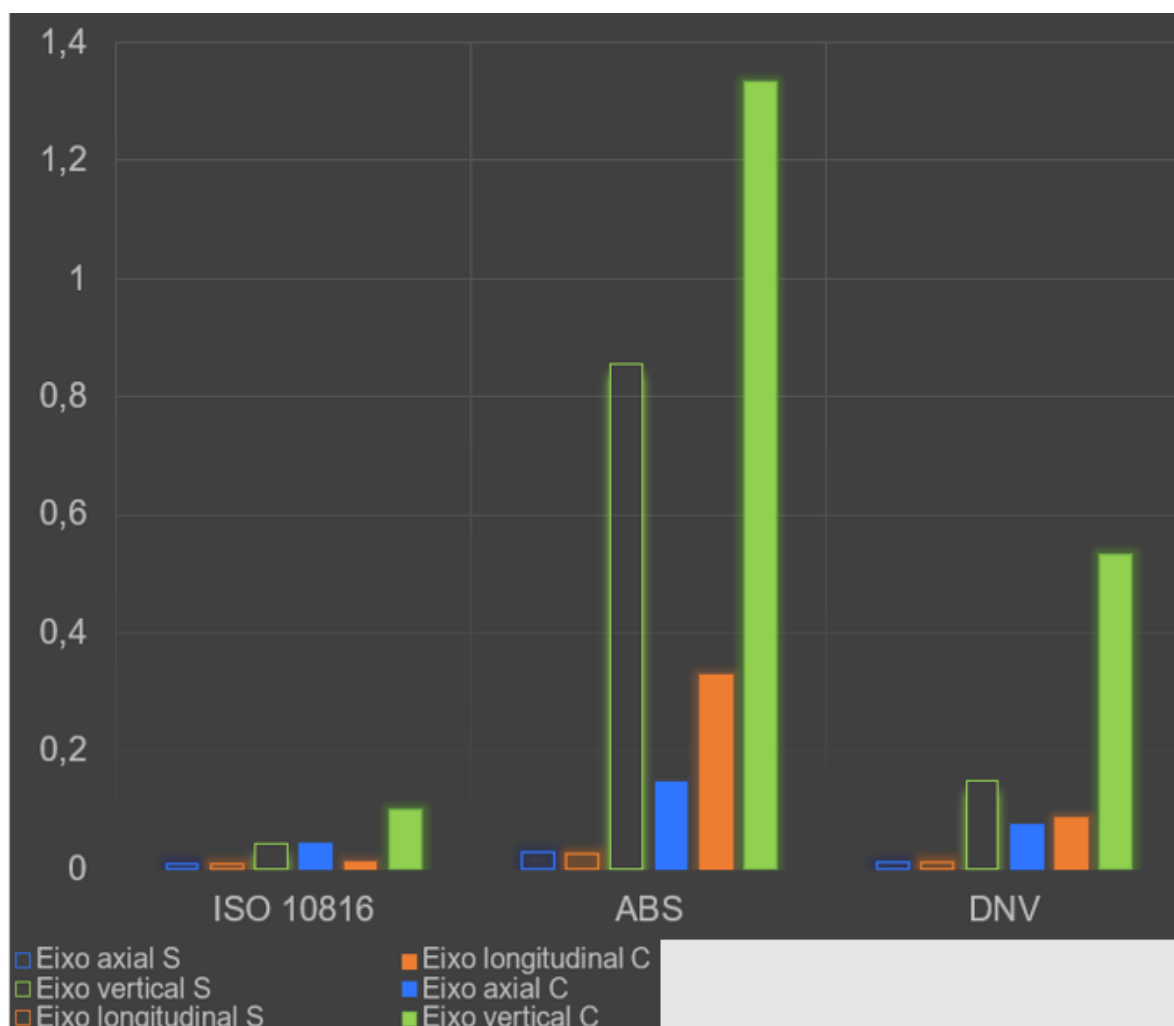


Figura 76 Gráfico com os resultados compilados do RMS, Elaboração própria.

Da ver a figura 79, constata-se que entre as diferentes normas verificam-se diferenças nas amplitudes dos resultados obtidos devido às considerações que cada norma contempla, por exemplo, gama de frequências, velocidade de funcionamento).

Adicionalmente, pode-se verificar que os valores dos resultados obtidos sem anomalia (retângulos vazios) são sempre inferiores relativamente aos com anomalia (retângulos a cheio) em qualquer um dos três eixos medidos.

Assim sendo, para o caso estudado pode-se concluir que com qualquer uma das normas é possível identificar a existência da anomalia.

Capítulo VII

Conclusão

Neste capítulo apresentam-se as conclusões gerais, as dificuldades e os trabalhos futuros.

7.1. Conclusões Gerais

A presente tese incide fundamentalmente no Controlo de Condição em máquinas rotativas e alternativas através da análise de vibrações, por forma a contribuir para o desenvolvimento das técnicas de manutenção na Marinha de São Tomé e Príncipe.

Sendo um dos objetivos finais a criação de condições para a implementação do Controlo de condição na Marinha de São Tomé e Príncipe (uma marinha que carece de apoio neste sentido), este objetivo foi concretizado. A dissertação não possui um capítulo “Estado da Arte”, mas sim um “Enquadramento”, uma vez que, não foi encontrado um estudo realizado com os mesmos objetivos traçados no início deste projeto, na bibliografia consultada.

A manutenção preditiva é de certa forma, um dos métodos mais económicos de se manter as máquinas operacionais, revelando necessário criar condições favoráveis para a correta aplicação do controlo de condição na Marinha de São Tomé e Príncipe,

Na verdade, a manutenção é um método que exige utilização de equipamentos custosos. Para contornar este problema, foi desenvolvido um programa de controlo de condição a ser implementado na Marinha de São Tomé e Príncipe. Esta etapa do trabalho fez com que aumentasse a capacidade de resolver vários problemas, quer a nível de programação, quer a nível dos conceitos teóricos estudados.

É difícil negar o impacto da pandemia na realização dos testes reais, contudo a Escola Naval criou condições para que se pudesse realizar experimentações no motor da sala 23.

Outra dificuldade, foi perceber as condições e as técnicas usadas atualmente na Marinha de São Tomé e Príncipe relativamente a Manutenção. Mas no final foi possível, não só, perceber o padrão de técnicas usadas, como também, enquadrar o novo programa no orçamento desta marinha, isto porque, obtiveram-se resultados muito satisfatórios.

É incrível como se pode realizar estudos complexos através da análise de vibrações. Apesar das condições da Marinha de São Tomé e Príncipe ainda não

serem as pretendidas, pode-se dizer que é possível implementar um programa de controlo de condição na Marinha de São Tomé e Príncipe.

7.2. Lições aprendidas

Uma das importâncias da realização de grandes trabalhos, consiste em fazer com que no final se aprenda. E este trabalho não foi diferente. As dificuldades que no início, pareciam comprometedoras, apenas ensinou que a persistência e a dedicação possibilitam grandes realizações.

Com os resultados reais, aprende-se que o sinal simulado pouco é, em comparação com a situação real. E para tal, é sempre importante que se tenha disponível as ferramentas necessárias para a resolução dos problemas do dia-dia.

A criação do aplicativo ensinou que se pode sempre criar uma solução alternativa para o problema, porém é importante garantir que a solução alternativa seja a mais simples possível, pois isso poderá fazer a diferença em momentos mais complicados.

Por vezes não existe uma solução ideal, por isso o melhor a fazer é aproximações a melhor solução atual. Apesar da confiança inicial, foi necessário refazer alguns cálculos e com isso só se aprende que não faz mal, não acertar logo a primeira, mas sim desistir com o erro. É muito importante manter a persistência em momentos difíceis.

7.3. Trabalhos Futuros

A análise de vibração é uma das muitas formas de monitorização das máquinas. Por isso, sugere-se que para trabalhos futuros, sejam também estudadas outras técnicas de monitorização, como por exemplo a termografia. Com a grande disponibilidade de resultados iguais, apesar de técnicas diferentes, há uma maior certeza da existência de anomalias.

Este trabalho assenta-se no Controlo de condição para a deteção prévia e/ou antecipada de danos. Contudo, há que se agir para que, posteriormente, a máquina não tenha uma avaria catastrófica. Por isso seria de grande utilidade, a realização do diagnóstico após a deteção. Isso possibilitaria perceber o tipo de avaria e

consequentemente realizar as devidas correções. E assim evitar que a máquina tenha uma avaria catastrófica.

Referências Bibliográficas

- Basak D, Tiwari A, Das S P. (2006). *Fault diagnosis and condition monitoring of electrical machines - A Review*. 2006 IEEE International Conference on Industrial Technology, pp. 3061-3066, doi: 10.1109/ICIT.2006.372719.
- Bilošová A, Biloš J. (2012). *Vibration Diagnostics*. Ostrava, República Checa.
- Blodt M, Granjon P, Raison B, Rostaing G. (2008). *Models for Bearing Damage Detection in Induction Motors Using Stator Current Monitoring*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 4, pp. 1813-1822, April 2008, doi: 10.1109/TIE.2008.917108.
- Castro M. (2013). *Controlo de Condição nos navios de Guerra*. Dissertação de Mestrado, Escola Naval, Base Naval de Lisboa, Alfeite, Almada, Portugal.
- Dewesoft D O, Smith G M. (2020). Tipos de conversores A/D - O guia definitivo. [Em linha]. Disponível em: <https://dewesoft.com/br/aquisicao-de-dados/tipos-de-conversores-ad>, [Consult. 12 abr. 2021].
- Direct industry. (2016). [Em linha]. Disponível em: <https://www.directindustry.com/pt/prod/rheintacho-messtechnik-gmbh/product-40140-485996.html>, [Consult. 15 jan. 2021].
- Duan F. (2010). *Diagnostics of Rotor and Stator Problems in Industrial Induction Motors*. Thesis for the degree of Masters of Engineering Science, School of Electrical and Electronic Engineering. The University of Adelaide, Australia.
- Fernandes M. (2019). *Vibração Mecânicas em Motores de Indução*. Dissertação de Mestrado, Escola Naval, Base Naval de Lisboa, Alfeite, Almada, Portugal.
- Gabinete de Inovação e Empreendedorismo de STP. (2014). Jornal Transparência. [Em linha]. Disponível em: <https://tinyurl.com/pr4er3yf>, [Consult. 10 jan. 2021].
- Ganeriwala L L. (2006). *Diagnostics of Induction Motor with Broken Bars Using Motor Current Signature Analysis (MCSA)*.

- LeNoX. (2021). *Transdutores de vibração mecânica*. [Em linha]. Disponível em: <https://www.lenox.ind.br/transdutores-vibracao-mecanica>, [Consult. 15 jan. 2021].
- Mac Tutor. (1997). Jean Baptiste Joseph Fourier. [Em linha]. Disponível em: <https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Fourier/>, [Consult. 15 jan. 2021].
- Marinha de Guerra Portuguesa. (2018). *Navios da Marinha chegaram a São Tomé e Príncipe*. [Em linha]. Disponível em: <https://www.marinha.pt/pt/media-center/Noticias/Paginas/Navios-da-Marinha-chegaram-a-Sao-Tome-e-Principe.aspx>, [Consult. 15 jan. 2021].
- Marinha Portuguesa. (1998). ILDNAV 802.
- Marinha Portuguesa. (1998). ILIMANT 512. ILIMANT 512.
- Meggitt SA. (2021). ILS730 signal conditioner. [Em linha]. Disponível em: <https://catalogue.meggittsensing.com/shop/sensors-and-signal-conditioners/signal-conditioners/ils730-signal-conditioner/>, [Consult. 15 jan. 2021].
- Monarch Instrument®. (2002). *Vibration Severity per ISO 10816*. [Em linha]. Disponível em: <https://www.intech2000.com/downloads/web/54/54.1/Applying%20Examiner.pdf>, [Consult. 12 abr. 2021].
- Nandi S, Toliyat H A, Li X. (2005). *Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors—A Review*. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, no. 4, pp. 719-729, Dec. 2005, doi: 10.1109/TEC.2005.847955.
- National Instruments. (2021). *Acquiring an Analog Signal: Bandwidth, Nyquist Sampling Theorem, and Aliasing*. [Em linha]. Disponível em: <https://www.ni.com/pt-pt/innovations/white-papers/06/acquiring-an-analog-signal--bandwidth--nyquist-sampling-theorem-.html>, [Consult. 15 jan. 2021].
- Regulateurs Europa Ltd. (2021). *Condition based monitoring systems*. [Em linha].

Disponível em: <https://tinyurl.com/39frk78v>, [Consult. 15 jan. 2021].

Ribeiro A M. (2009). *Uma abordagem sobre detecção de barras quebradas em motores de indução*. XIII Reunião Iberoamericana de CIGRÉ, Puerto Iguazú, Argentina.

Sampaio R P. (2021). Rui Pedro Chedas Sampaio. [Em linha]. Disponível em: <https://www.chedassampaio.net>, [Consult. 15 jan. 2021].

Thorsen O, Dalva M. (2007). *Methods of Condition Monitoring and Fault Diagnosis for Induction Motors*. European Transactions on Electrical Power, 8, pp. 383 – 395, doi: 10.1002/etep.4450080510.

Apêndice A – Tabela com valores limites da ABS

TABLE 4 Vibration Limits for Main Propulsion Machinery	
<i>Propulsion Machinery</i>	<i>Limits (rms)</i>
Thrust Bearing and Bull Gear Hub	5 mm/s
Other Propulsion Machinery Components	13 mm/s
Stern Tube and Line Shaft Bearing	7 mm/s
Diesel Engine at Bearing	13 mm/s
Slow & Medium Speed Diesel Engine on Engine Top (over 1000 HP)	18 mm/s
High Speed Diesel Engine on Engine Top (less 1000 HP)	13 mm/s

Apêndice B – Tabelas com valores limites da DNV GL

Part 6 Chapter 8 Section 2

Table 3 Steel

Velocity
4 – 200 Hz
45 mm/s

Table 4 Aluminium

Velocity
4 – 200 Hz
15 mm/s

2.2.2.2 For further evaluation, structural vibration may be assessed by dynamic strain measurements in conjunction with relevant material fatigue data.

2.2.2.3 For structural details with known global stresses, the standard vibration limits may be changed.

2.3 Vibration in machinery and components

2.3.1 Scope

2.3.1.1 Machinery vibration levels will be indicators of sound mounting, balancing and alignment for new installations as well as indicators of working performance for machinery in operation.

2.3.1.2 The criteria shall apply to all permissible operating speeds and loads at stable running conditions. Possible restricted operating ranges shall be clearly defined.

2.3.2 Criteria

2.3.2.1 The criteria shown in Table 5 to Table 18 are not to be exceeded for the relevant machinery. The criteria shall apply for internally and externally excited vibration unless otherwise noted.

Table 5 Shaft line bearings

Velocity
1 – 200 Hz
5 mm/s
To be measured horizontally or vertically with the shaft centre. Shaft line vibration is specified in Pt.4 Ch.4 Sec.1. Frequency spectra to be presented to identify low frequency components.

Table 6 Diesel engines < 200 rpm

	1 – 200 Hz	
	Displacement	Velocity
Vertical	1 mm	10 mm/s
Longitudinal	1 mm	10 mm/s

Rules for classification: Ships – DNVGL-RU-SHIP Pt.6 Ch.8. Edition July 2020
 Living and working conditions

Page 35

DNV GL AS

Figura 77 Valores limites estipulados pela Norma DNV

Apêndice B – Tabelas com valores limites da DNV GL

Transverse	1.5 mm	25 mm/s
To be measured at the top of the A – frame at engine ends. Frequency spectra to be presented to identify low frequency components.		

Table 7 Diesel engines > 200 rpm

Velocity	
4 – 200 Hz	
Firmly mounted	Resiliently mounted
15 mm/s	25 mm/s
To be measured on the engine block top and bottom. 20% overshoot of the above criteria allowed for non-continuous running in the operating speed range.	

Table 8 Turbochargers

4 – 200 Hz		
Total combined power from cylinder group serving one turbocharger	Velocity	Acceleration
Below 5 MW	45 mm/s	2.5 g
5 - 10 MW	50 mm/s	2.0 g
Above 10 MW	55 mm/s	1.5 g
To be measured at the top of compressor casing. 20% overshoot of the above criteria allowed for non-continuous running in the operating speed range.		

Table 9 Diesel driven generators and electrical motors on thrusters

Velocity
4 – 200 Hz
18 mm/s
To be measured in any direction on the bearings. Applies to both fixed and resilient mounted. 1 st order vibration above 7 mm/s r.m.s. should be investigated.

Table 10 Turbines

Velocity
4 – 1000 Hz
7 mm/s
To be measured in any direction on the bearings. Applies to both fixed and resilient mounted.

Figura 78 Valores limites estipulados pela Norma DNV

Apêndice B – Tabelas com valores limites da DNV GL

Table 11 Turbine driven generators

Velocity
4 – 1000 Hz
7 mm/s
To be measured in any direction on the bearings. Applies to both fixed and resilient mounted.

Table 12 Gears

Velocity
4 – 1000 Hz
7 mm/s
To be measured in any direction on the foundation and on the input shaft bearing.

Table 13 Electric motors, separators, motor driven hydraulic pumps, fans not installed on reciprocating engines

	Velocity
	4.0 – 200 Hz ¹⁾
Internal excited	7 mm/s ²⁾
External excited	12 mm/s ²⁾
To be measured in any direction on the bearings.	
1) The upper frequency limit shall be at least 200 Hz and above 2 x rpm.	
2) For vertically mounted motors the vibration level may be increased by 50% for the top of the motor.	

Table 14 Compressors (screw or centrifugal)

	Velocity
	4 – 200 Hz ¹⁾
Elastically mounted	10 mm/s
Fixed mounted	7 mm/s
To be measured in any direction on the bearings.	
1) The upper frequency limit shall be at least 200 Hz and above 2x rpm.	

Table 15 Reciprocating compressors and reciprocating pumps

Velocity
4 – 200 Hz
30 mm/s
To be measured in any direction on the bearings. Applies for both resilient and fixed mounted.

Figura 79 Valores limites estipulados pela Norma DNV

Apêndice B – Tabelas com valores limites da DNV GL

Part 6 Chapter 8 Section 2

Table 16 Boilers

Velocity
4 – 200 Hz
45 mm/s
To be measured on stiff parts, e.g. lugs, flanges, etc.

Table 17 Pipes

Velocity
4 – 200 Hz
45 mm/s

Table 18 Electronic instruments and equipment

	Velocity
	4 – 200 Hz
Mounted on bulkheads	12 mm/s
Mounted on masts	20 mm/s
Mounted on machinery	25 mm/s

Figura 80 Valores limites estipulados pela Norma DNV

Apêndice C – Tabelas com valores limites da ISO 10816

Table B.1 — Typical zone boundary limits				
R.m.s. vibration velocity mm/s	Class I	Class II	Class III	Class IV
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71				
1,12	B	B	B	B
1,8				
2,8	C	C	C	C
4,5				
7,1	D	D	D	D
11,2				
18				
28				
45				

Figura 81 Valores limites estipulados pela Norma ISO 10816

Table A.1 — Recommended values for bearing housing or pedestal vibration velocity at zone boundaries for large steam turbines and generators		
Zone boundary	Shaft rotational speed r/min	
	1 500 or 1 800	3 000 or 3 600
	r.m.s. vibration velocity at zone boundaries mm/s	
A/B	2,8	3,8
B/C	5,3	7,5
C/D	8,5	11,8

Figura 82 Valores limites estipulados pela

Table A.1 — Recommended values for bearing housing or pedestal vibration velocity at zone boundaries for gas turbines	
Zone boundary	r.m.s. vibration velocity at zone boundaries mm/s
A/B	4,5
B/C	9,3
C/D	14,7

Figura 83 Valores limites estipulados pela

Apêndice D – Figuras do motor da sala 23 da Escola Naval Portuguesa



Figura 84 Motor da sala 23, usado para experimentações.



Figura 85 Motor da sala 23, usado para experimentações

Apêndice E – Figuras com as codificações do programa em Labview

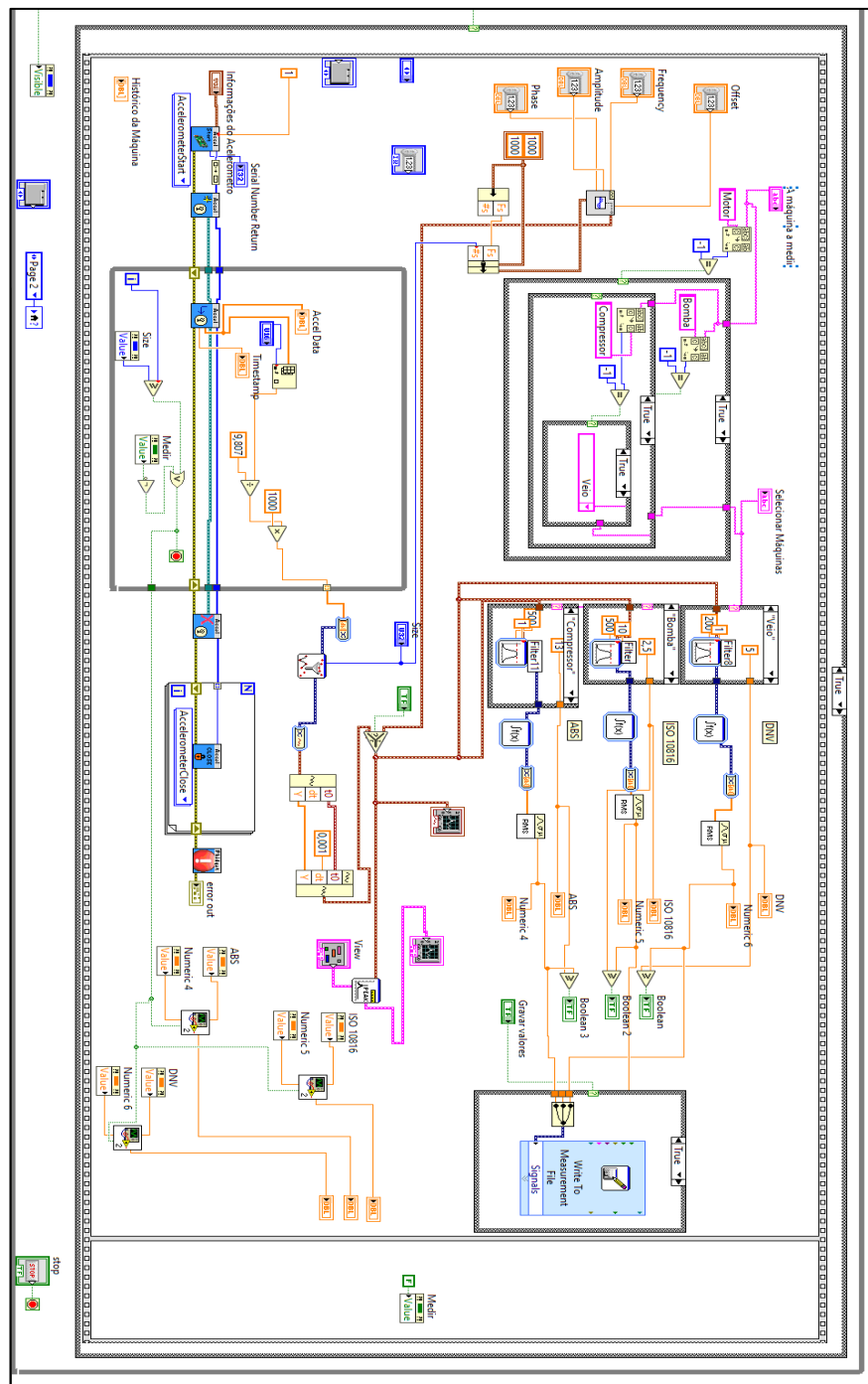


Figura 86 Codificação do Programa

Apêndice F – Figuras com as imagens do painel frontal em *Labview*

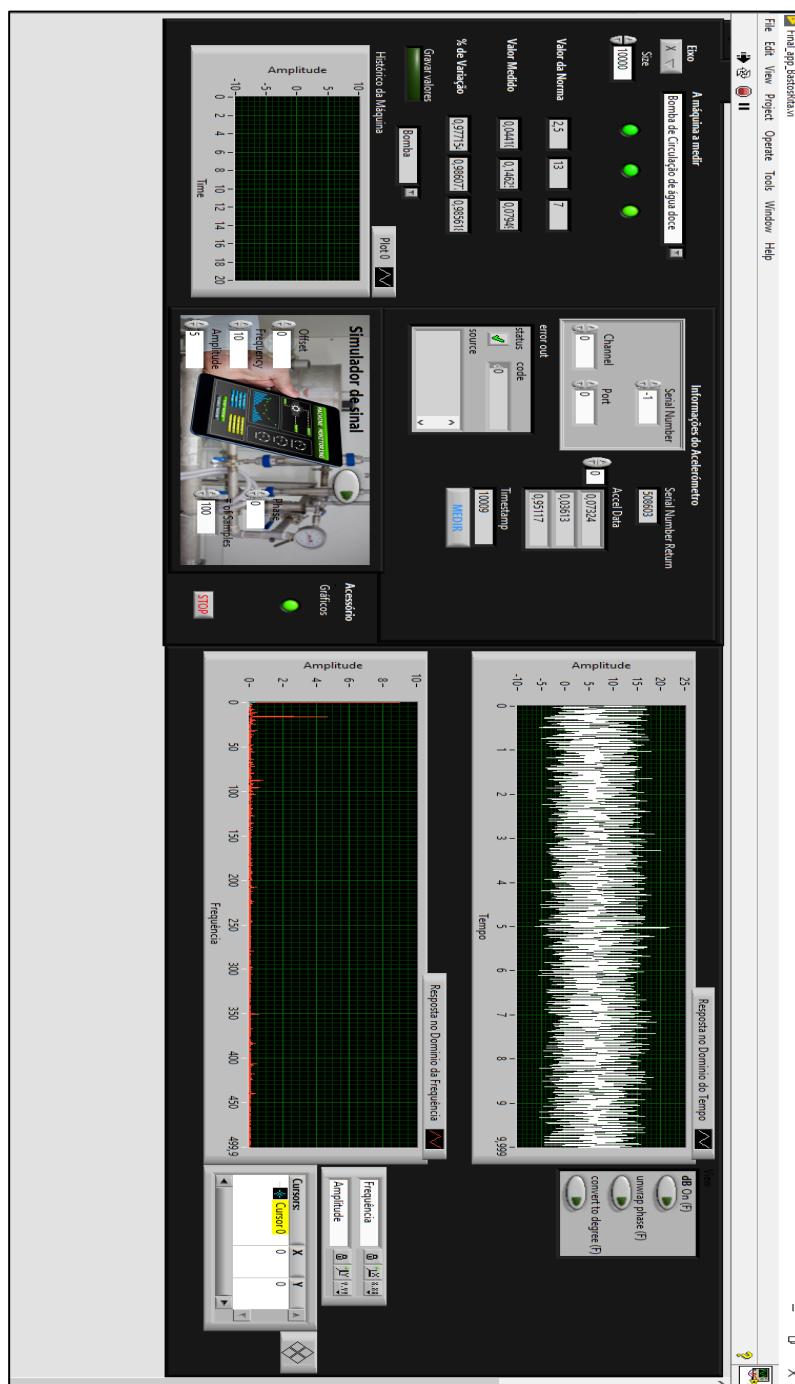


Figura 87 Painel frontal principal

